

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS DE MODULACIÓN ÓPTICA CON DISPOSITIVOS ELECTRO-OPTICOS.

4.1 Introducción

El proceso superponer información en una señal luminosa se conoce como modulación óptica, la cual se requiere para la transmisión de información a través de fibra óptica. Este proceso puede aplicarse directamente sobre la fuente óptica usando la técnica de ‘Modulación Directa’ o de manera indirecta usando la técnica de ‘Modulación Externa’. A continuación se presentan las principales características de cada una de estas técnicas^[35].

4.2 Modulación directa de intensidad

Desde los primeros días de las comunicaciones por fibra óptica, se han intentado distintas técnicas de modulación con distintos grados de éxito. La forma más simple es encender y apagar el laser rápidamente. Aunque es efectiva, esta técnica tiene graves desventajas: conforme la velocidad con que el laser se enciende y se apaga, la luz tiende a cambiar, de manera que la luz que se recibe es menos clara y es más difícil de detectar de manera precisa. Esta variación es conocida como *chirp* que es una fluctuación en las componentes espectrales y/o en la amplitud de la potencia a la salida del dispositivo, provocando la necesidad de una modulación con un dispositivo independiente al laser, para altas frecuencias^[35].

La Figura 4.1 muestra el circuito básico de modulación directa, el cual consiste simplemente en polarizar la fuente luminosa para que emita luz a razón de la señal modulante.

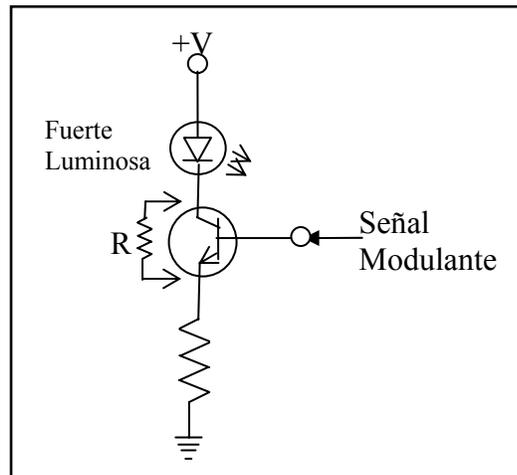


Figura 4.1 Circuito básico de polarización y modulación directa^[36].

La máxima velocidad de modulación de la fuente óptica depende básicamente del tiempo de recombinación de los portadores, así como de las capacidades asociadas al semiconductor. Este modo de modulación funciona para velocidades de modulación de hasta 600 Mbps^[7].

El diodo laser logra valores de potencia mayores a los de un LED (Light emitting Diode), además de emitir los diodos laser de forma coherente (emitir en una sola longitud de onda a la misma intensidad), lo que implica enlaces ópticos a mayor distancia, por esa razón, como fuente óptica para tipo de enlaces de kms, se usa principalmente el diodo laser. No obstante para enlaces cortos el LED es la fuente de onda más usada^[7].

En la Figura 4.2 se muestra el proceso de emisión estimulada de un laser, éste se presenta una vez que se alcanza el valor de corriente I_{TH} . Antes de ese punto solo hay

emisión espontánea. Para lograr un estado en el diodo laser de apagado ó 0, la corriente que alimenta al diodo tiene que estar alrededor del valor " I_{TH} ". Mientras que el valor máximo encendido ó 1, se logra con el valor máximo que éste dentro del rango de operación que marca el fabricante para el dispositivo^[7] El proceso de emisión estimulada es proporcional a la concentración de fotones (la energía adecuada para causar la transición electrón-hueco). Los fotones emitidos tendrán la misma fase que los fotones incidentes causantes de la emisión, es decir, tendrán la misma energía y vector de onda y generando esta emisión en una cavidad óptica tal que los fotones que posean una energía bien definida sean confinados de forma selectiva en la estructura del semi conductor, dado como resultado sería señal de salida con un espectro de emisión muy estrecho. Todo este proceso requiere su tiempo y su valor de corriente especifico dando un rango de frecuencias relacionado con sus características físicas^[52].

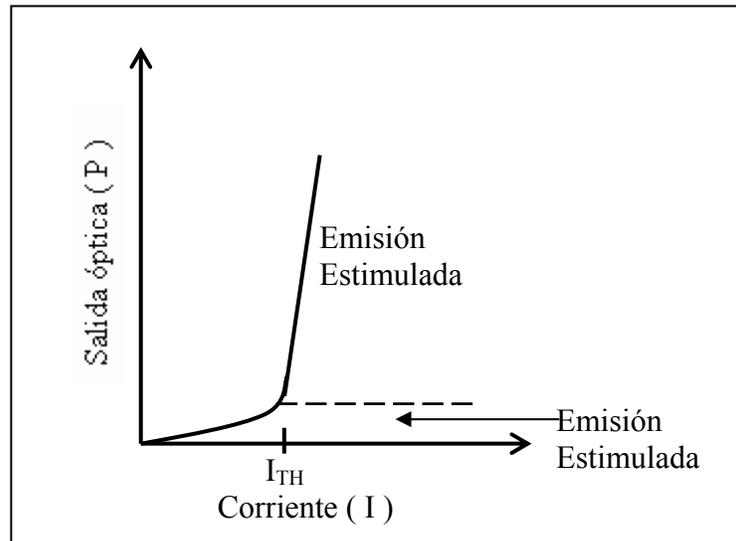


Figura 4.2 Curva de respuesta de un diodo laser^[37].

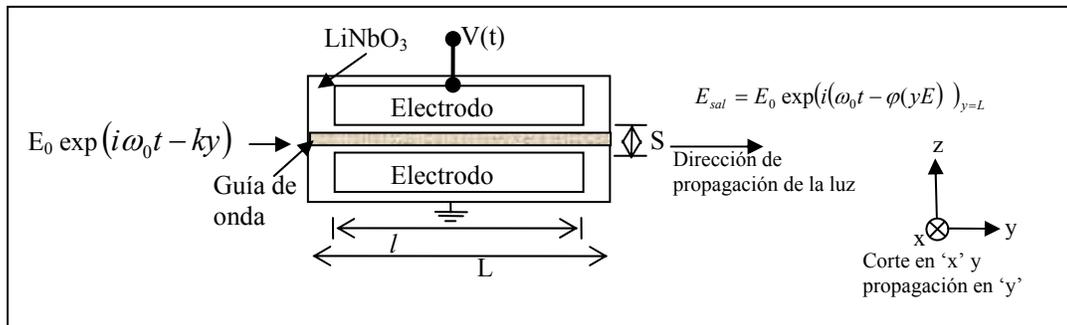
Cuando deseamos transmitir información por encima de 1 Gbps, los diodos laser, ya no son capaces de trabajar a estas velocidades sin presentar el efecto *chirp*, por lo que se requiere de una modulación externa para lograrlo^[38].

4.3 Modulación de fase óptica.

La modulación de fase es una modulación externa la cual modula directamente a la onda luminosa, lográndolo altas frecuencias gracias a esto. La modulación de fase de una señal luminosa se hace a través de guías de onda en Niobato de Litio con difusión de titanio. Se consigue al aplicación un voltaje ($V(t)$) a los electrodos posicionados sobre el cristal de Niobato de Litio. El campo producido por $V(t)$, tiene una interacción electro-óptica con el Niobato de Litio e induce un cambio en sus índices de refracción. La guía de onda óptica tiene una orientación específica de corte y propagación, por ejemplo:

Cuando un haz de luz incide en el plano “x-z”, a la entrada de la guía de onda óptica, (ver Figura 4.3). La dirección de propagación del haz luminoso se realiza en la dirección “y”. En el plano “x-z” se analizan los modos transversales eléctricos y magnéticos del haz de luz de entrada^[38].

La Figura 4.3 muestra un modulador de fase. El cual consiste de una guía de onda monomodo rectilínea y dos electrodos de longitud “ l ” y separados por una distancia “ S ”^[40].
 Figura 4.3 Modulador de fase en óptica integrada con una guía de onda óptica rectilínea^[40].



A la entrada de la guía de onda (en la posición $y=0$) se tiene una señal Óptica de la forma:

$$E_{ent}(t) = E_0 \exp(i\omega_0 t - ky) \quad (4.1)$$

Donde: “ l ” es la longitud de los electrodos, ω es la frecuencia angular; k es el número de ondas $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y “ y ” es la posición en “ y ”.

Cuando la señal óptica definida por la ecuación (4.1), hace su recorrido a través del modulador de fase, se aplica un campo eléctrico por medio de un voltaje $V(t)$ que se inyecta a los electrodos de longitud “ l ” y haciéndose presente el efecto electro-óptico lineal o efecto Pockels, modificando la elipsoide de índices de refracción, obteniendo una alteración en la polarización del haz luminoso^[40].

A la salida de la guía de onda ($y=L$) se observa que la señal óptica ha sido modificada en la forma:

$$E_{sal} = E_0 \exp(i(\omega_0 t - \varphi(yE)))_{y=L} \quad (4.2)$$

Es decir, la fase se ha convertido en una función del campo eléctrico aplicado en el modulador de fase, y este cambio de fase se expresa como:

$$\Delta\varphi = k_0 n(\vec{E})l + k_0 nL \quad (4.3)$$

Donde $n(\vec{E})$ es el índice de refracción en función del campo eléctrico (\vec{E}) aplicado; n el índice de refracción ordinario ó extraordinario; k_0 el número de ondas en el vacío $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ y $\Delta\varphi$ la variación de fase. Considerando el efecto Pockels en la ecuación (4.3) se obtiene^[40]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} nL - \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{1}{2} n^3 r \Gamma l \quad (4.4)$$

Donde λ 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” ó “x”. Γ es el coeficiente de superposición óptico entre el campo eléctrico de la onda luminosa y el campo eléctrico del voltaje aplicado y $V(t)$ es el voltaje aplicado, que representa una señal de información (audio, vídeo, datos, etc.). En la ecuación (4.4), se hace que la fase constante en el vacío (φ_0) como $\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} nL$. y la magnitud del campo eléctrico se expresa como $E = \frac{V(t)}{S}$ donde “S” es la separación de los electrodos. Aplicando estas igualaciones en la ecuación (4.4) se tiene lo siguiente^[40]:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \left(\frac{\pi}{\lambda_0}\right)\left(\frac{l}{S}\right)n^3 r\Gamma V(t) \quad (4.5)$$

De la ecuación (4.5) se deduce que el voltaje de media onda (V_π) se da cuando

$\left(\frac{\pi}{\lambda_0}\right)\left(\frac{l}{S}\right)n^3 r\Gamma V(t) = \pi$, por consiguiente se define en la siguiente ecuación.

$$V_\pi = \left(\frac{\lambda_0}{n^3 r\Gamma}\right)\left(\frac{S}{l}\right) \quad (4.6)$$

El voltaje de media onda se aplica cuando el cambio de fase se realiza por media longitud de onda o por π . V_π es una característica importante del modulador de fase^[40]. Considerando el corte del cristal y el modo de propagación de la onda luminosa se tiene la ecuación (4.6) de la manera siguiente:

a) Corte en z propagación y, $V_\pi = \frac{\lambda S}{n_e^3 r_{33} \Gamma_{TM} l}$ (4.7)

b) Corte en x propagación y, $V_\pi = \frac{\lambda S}{n_o^3 r_{13} \Gamma_{TE} l}$ (4.8)

Donde S es la separación de los electrodos, λ es la longitud de onda, l es la longitud de los electrodos, n_o y n_e son los índices ordinario y extraordinario respectivamente, r_{33} y r_{13} son los coeficientes electro ópticos, Γ_{TM}, Γ_{TE} son los coeficientes de superposición^[41].

Aplicando la ecuación (4.7) con valores para las variables, se tiene lo siguiente:

Para un modulador de fase con Niobato de Litio en corte “z” y propagación en “y”, a $\lambda = 1300nm$ y utilizando el coeficiente electro óptico r_{33} , una separación con $S=10 \mu m$ y $\Gamma_{TM}=0.35$ el voltaje de media onda es de $V_{\pi} = 12.2028 V$, para una longitud de electrodos de apenas 1 cm. Lo cual indica que la proporción es lineal con una pendiente de $180/12.2028$ lo que da una razón de que por cada volt se varía $14.7507^{[7]}$.

El voltaje de Media onda V_{π} para un modulador de fase en Niobato de Litio $LiNbO_3$ en corte “x” y propagación en “y” puede calcularse mediante la ecuación (4.8), para las mismas condiciones del caso anterior, obteniéndose un voltaje $V_{\pi}=46.017$ volts. Lo cual indica que no importa el corte. La variación de la fase es proporcional al voltaje aplicado y en este caso solo varía la pendiente a $180/46.017$, lo que da una razón de que por cada volt se varía $3.8284^{[7]}$.

El modulador de fase óptica al ser insertado entre dos polarizadores puede convertirse en un modulador de intensidad, (ver Figura 4.4).

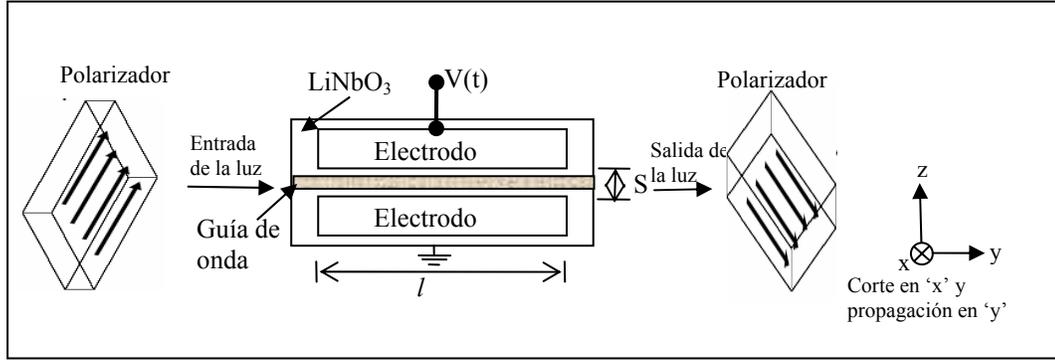


Figura 4.4. Modulador de fase óptica, insertado entre dos polarizadores para que funcione como un modulador de intensidad óptica^[40].

En esta estructura el rayo luminoso se descompone en modos ordinario y extraordinario, linealmente polarizados a lo largo de los ejes “x” y “z” del cristal de Niobato de Litio como consecuencia de la birrefringencia (dos índices de refracción) del material. El polarizador de entrada está orientado a 45° con respecto a estos ejes, de manera que los campos ópticos se propagan en la dirección “y”, esto se puede expresar como^[40]:

$$E(y) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (\exp[i\varphi_z(y)]z + \exp[i\varphi_x(y)]x) \quad (4.9)$$

Cuando se aplica un voltaje $V(t)$ a lo largo del eje x, se induce una variación en las fases ópticas φ_x y φ_z dando como resultado una variación global a la salida del modulador, dada por:

$$\Delta\varphi[V(t), l] = \varphi_x[V(t), l] - \varphi_z[V(t), l] = \Delta\varphi_m V(t) + \Delta\varphi_B \quad (4.10)$$

Donde $\Delta\varphi_m V(t)$ Representa la variación de fase en función del campo eléctrico aplicado con la formula siguiente:

$$\Delta\varphi_m V(t) = \frac{2\pi \cdot n^3}{\lambda^2} \frac{\Gamma l}{d} (r_{33} - r_{13}) V(t) \quad (4.11)$$

Y $\Delta\varphi_B = \varphi_x(l) - \varphi_z(l)$, representando la variación de fase estática en función de la longitud de los electrodos en cristal (l) por lo que se puede expresar como^[40]:

$$\Delta\varphi_B = \frac{2\pi}{\lambda}(n_z - n_x)l \quad . \quad (4.12)$$

Como se mostró en la Figura 4.4, el polarizador de salida es rotado 90° con respecto al polarizador de entrada (polarización cruzada), lo que permite convertir la modulación de fase en variación de intensidad. La función de transmitancia óptica del sistema mostrado en la figura (4.4), en función del voltaje aplicado, obedece a la expresión siguiente^[42]:

$$\frac{P_{sal}}{P_{ent}}[V(t)] = \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\varphi[V(t)l]}{2}\right) = \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\varphi_B + \Delta\varphi m V(t)}{2}\right) \quad (4.13)$$

La Figura 4.5, muestra que la transmitancia varía entre “0 y 1”. Para un modulador de intensidad, con esta geometría el voltaje de media onda V_π está dado por:

$$V_\pi = \left(\frac{\lambda S}{n_e^3 r_{33} \Gamma_{TM} - r_{13} n_o^3 \Gamma_{TE}}\right) l \quad (4.14)$$

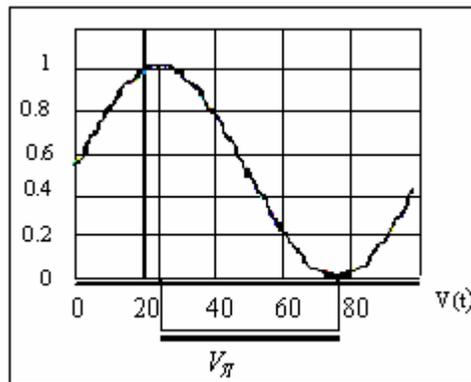


Figura 4.5. Voltaje contra transmitancia de un modulador de intensidad óptica^[42].

Para el Niobato de Litio, con un corte en “x” y propagación en “y”, con $l= 10$ mm y $S= 10000$ nm, operando a una longitud de onda $\lambda =1300$ nm y con $\Gamma_{TM} = 0.30$ m, el voltaje de media onda $V_{\pi}=46.03$ volts, como se puede observar en la Figura 4.5.

Con esto se comprueba que la onda luminosa que atraviesa la guía de onda se puede modular en intensidad a través del cambio de fase, siendo esta modulación de intensidad proporcional al voltaje entre 0 y V_{π} Volts aplicado a los electrodos de la guía de onda.^[42].

4.4 Modulador de intensidad tipo Mach-Zehnder.

Los moduladores electro-ópticos externos son componentes fundamentales en los sistemas de comunicaciones ópticas actuales. Su rango de aplicación comprende los sistemas digitales de alta velocidad, así como los sistemas de distribución de televisión por cable (*CATV [Antena común de televisión]*). El arreglo más común es el tipo Mach-Zehnder.

El modulador Mach-Zehnder actúa como modulador de intensidad ya que cada rama propaga la luz y puede alterar las fases de uno de los brazos, dando que a la salida se sumen las fases de cada rama^[7].

El modulador de intensidad interferométrico tipo Mach-Zehnder funciona de la siguiente manera (ver Figura 4.6): La señal óptica entra en la guía de onda (P_{en}) y se divide en dos. Formando una Y (Divide la intensidad óptica a 50%). En un brazo se encuentran depositados los electrodos para formar el desfase entre las dos guías de onda (ver figura 4.6).

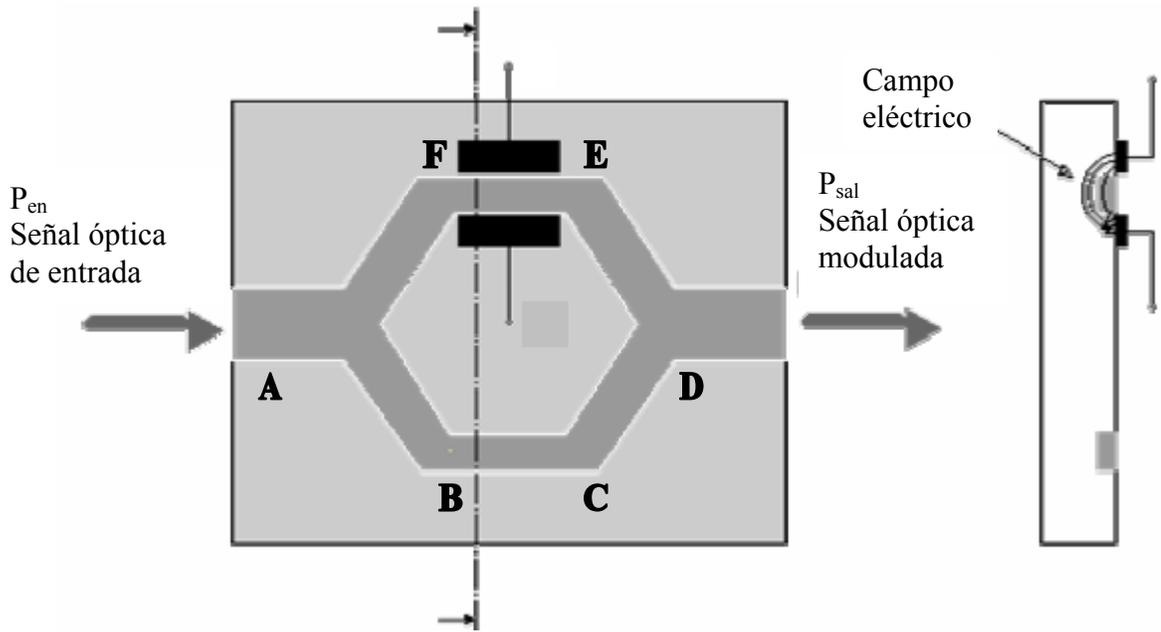


Figura 4.6 Esquema de modulador de intensidad tipo Mach-Zehnder^[25].

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, tal como se ha descrito en la sección anterior. En el punto D de la figura (4.6) se realiza una superposición de las ondas que viajan en los brazos del interferómetro, para obtener así en la salida el término P_{sal} , el cual se representa como^[25]:

$$P_{sal} = \frac{1}{2}P_{en} + \frac{1}{2}P_{en} \cos \Delta\phi \quad (4.15)$$

Donde P_{en} es la potencia óptica de entrada y P_{sal} es la potencia óptica de salida. $\Delta\phi$ 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 $\Delta\phi$ la diferencia de fase entre las dos señales que recorren campos ópticos paralelos está dada de acuerdo a esta relación^[42]:

$$\frac{P_{sal}}{P_{en}} = \frac{1}{2}(1 + \text{Cos}\Delta\varphi) \quad (4.16)$$

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^[42].

El rango de la 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 típicamente controlado por la inyección de una señal de voltaje $V(t)$ en uno de los brazos del dispositivo, comportándose como un modulador de fase descrito en la sección anterior. La transmisión óptica es una función del voltaje aplicado y puede ser escrita como^[42]:

$$\frac{P_{sal}}{P_{en}} = \frac{1}{2} \left(1 + \text{Cos} \left[\frac{\pi V(t)}{V_{\pi}} + \theta_B \right] \right) \quad (4.14)$$

De la ecuación (4.14), se muestra el valor de V_{π} , que es el voltaje de media onda.

$$V_{\pi} = \frac{\lambda S}{n^3 r \Gamma l} \quad (4.15)$$

Donde λ 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” ó “x”. Γ 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.

En la figura (4.7), se muestra la relación de la potencia óptica contra el voltaje aplicado a los electrodos^[42].

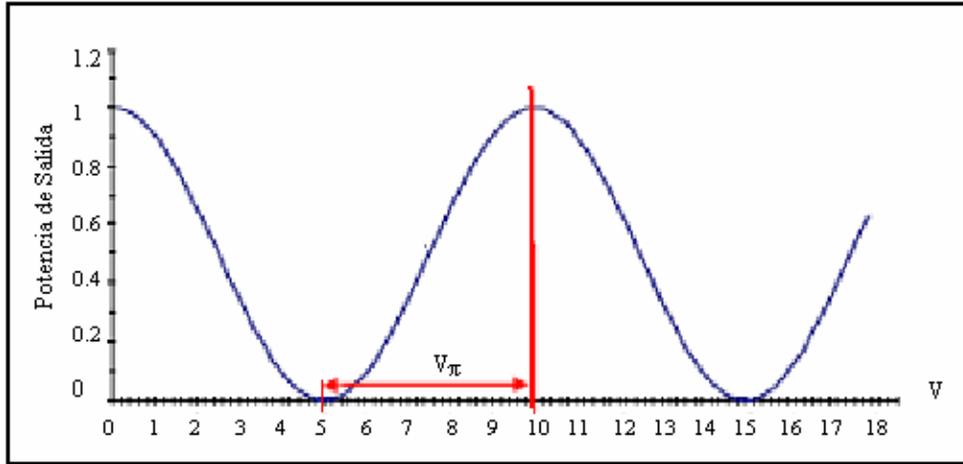


Figura 4.7 Grafica de voltaje contra potencia de salida del modulador^[25].

Al tener el valor de V_{π} se conoce el rango de operación del modulador. La figura (4.8), muestra que en el rango operacional entre 0 y V_{π} volts se pueden introducir señales de voltaje que se encuentren en el rango de V_{π} que dan a la salida señales de potencia óptica^[25].

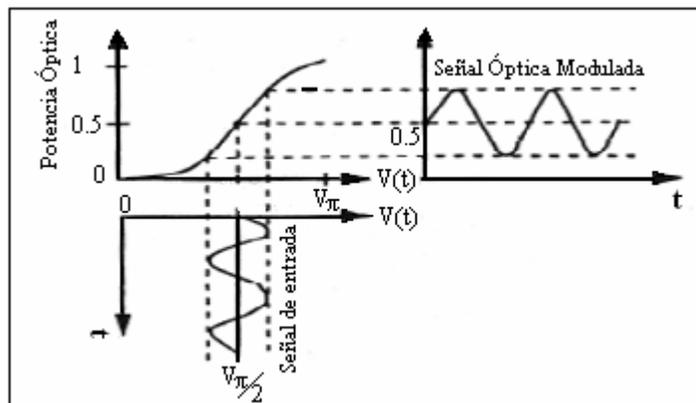


Figura 4.8 Rango de operación de señal de entrada^[25].

4.5 Conclusión.

Para modular en intensidad una onda luminosa existen dos formas para lograrlo: Modulando directamente y Modulando de forma externa. La modulación directa consiste en controlar la intensidad que la fuente luminosa emite, pero al hacer una modulación digital de frecuencias de Gbps presenta el efecto de *chirp*. Este efecto es una variación con respecto a lo especificado por la fuente en las componentes espectrales y/o en la amplitud de la potencia a la salida del dispositivo y en la fase de recuperación de señal no se pueden distinguir y provoca incertidumbre. La modulación externa resuelve el efecto de *chirp* pues consiste en hacer pasar la onda luminosa por una guía de onda que al inducirle un campo eléctrico varía sus propiedades refractivas y se altera la fase de la onda, con lo cual se puede modular la intensidad de la misma, todo sin manipular la fuente luminosa.

La modulación externa esta basada en tecnología de óptica integrada y se usa principalmente como guía de onda el cristal de niobato de litio, por sus características electro-ópticas. La modulación de intensidad se puede hacer usando polarizadores o con un arreglo interferométrico tipo Mach-Zehnder, el cual es el tipo de modulador que se utilizará en esta tesis. El rango de operación de modulador externo se conoce como V_{π} y representa el valor de voltaje aplicado al modulador para que se realice el máximo cambio que va de 0volts para que la onda luminosa no presente ningún cambio, hasta el valor de V_{π} Volts, con lo cual se presenta el máximo cambio, que es la anulación de la onda. El modulador se puede fabricar para alcanzar valor de V_{π} del orden de los 6Volts, de esta forma es fácil implementarlo para los circuitos electrónicos.