

Capítulo 5

Fuentes de radiación óptica

La función de los transmisores ópticos es la de convertir una señal eléctrica de entrada en la señal óptica correspondiente y enviarla a la fibra óptica, la cual sirve como canal de comunicación. El componente principal de cualquier transmisor óptico es una fuente óptica. Los sistemas de comunicaciones basados en fibras ópticas generalmente utilizan fuentes ópticas semiconductoras tales como diodos emisores de luz (LED's) y láseres semiconductores debido a las numerosas ventajas inherentes que ofrecen. Algunas de estas ventajas son tamaño pequeño, alta eficiencia, gran confiabilidad, rango espectral adecuado, área de emisión pequeña compatible con las dimensiones del núcleo de la fibra y la posibilidad de una modulación directa a frecuencias relativamente altas. A pesar de que su funcionamiento se demostró desde 1962, los láseres semiconductores se han usado de manera práctica sólo a partir de 1970, cuando estuvieron disponibles láseres semiconductores que operaban a temperatura ambiente [1]; desde entonces, estos dispositivos, conocidos también como diodos láser o láseres de inyección, han tenido un amplio desarrollo y numerosos libros dedicados a ellos debido a su importancia para las comunicaciones ópticas.

5.1 Conceptos básicos

Bajo condiciones normales todos los materiales absorben luz en lugar de emitirla. El proceso de absorción puede ser comprendido con ayuda de la figura 5.1, donde los niveles de energía E_1 y E_2 corresponden respectivamente a los estados basal y excitado de los átomos del medio absorbente.

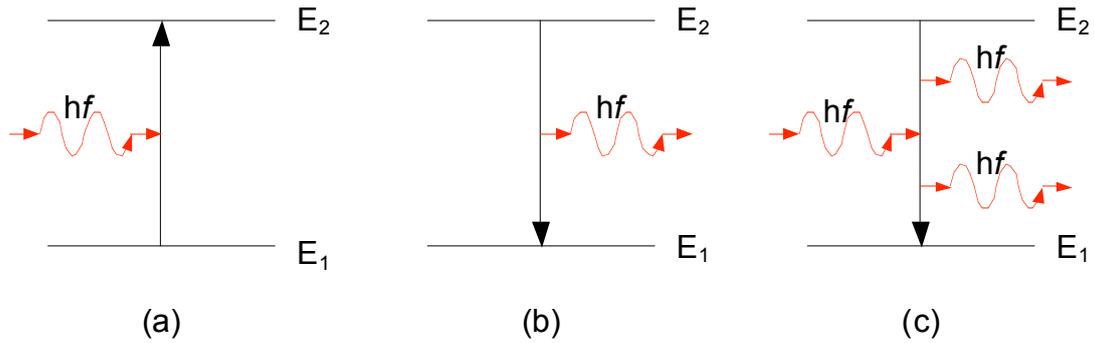


Figura 5.1 Tres procesos fundamentales ocurriendo entre dos estados de energía de un átomo: (a) Absorción; (b) emisión espontánea; (c) emisión estimulada [1].

Si la energía hf de un fotón perteneciente a la luz incidente de frecuencia f es aproximadamente de la misma magnitud que la diferencia de energía $E_g = E_1 - E_2$, el fotón es absorbido por el átomo, el cual pasa al estado excitado. La luz incidente es atenuada como resultado de numerosas ocurrencias de estas absorciones dentro del medio.

A la larga, los átomos excitados regresan a su estado basal y emiten luz en el proceso. La emisión de luz puede ocurrir a través de dos diferentes procesos fundamentales: la emisión espontánea y la emisión estimulada, que se ilustran en la figura 5.1. En el caso de la emisión espontánea, los fotones son emitidos en direcciones aleatorias sin relación de fase alguna entre ellos. En cambio, la emisión estimulada es iniciada por un fotón previamente existente. El rasgo estable de la emisión estimulada es que el fotón emitido posee las mismas características de fase, frecuencia y dirección de propagación que el fotón que desencadenó la emisión. Todos los láseres (incluyendo los láseres semiconductores) emiten luz a través de este proceso y por ello se dice que emiten luz coherente. En contraste, los LED's emiten luz a través del proceso incoherente de emisión espontánea.

5.1.1 Tasas de emisión y de absorción.

Considérese un sistema atómico de dos niveles energéticos en interacción con un campo electromagnético a través de las transiciones mostradas en la figura 5.1. Si N_1 y N_2 son las densidades atómicas en el estado basal y el excitado respectivamente, y $\rho_{em}(f)$ es la densidad espectral de la energía electromagnética, entonces las tasas de emisión espontánea, emisión estimulada y absorción pueden ser escritas de la siguiente manera:

$$R_{emi\ espont} = AN_2; \quad R_{emi\ estim} = BN_2\rho_{em}; \quad R_{absor} = B'N_1\rho_{em} \quad (5.1.1)$$

donde A, B y B' son constantes.

En el equilibrio térmico las densidades atómicas se distribuyen de acuerdo con la distribución de probabilidad de Boltzman, esto es:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(\frac{-E_g}{k_B T}\right) = \exp\left(\frac{-hf}{k_B T}\right) \quad (5.1.2)$$

donde k_B es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta. Ya que ni N_1 ni N_2 cambian con el tiempo en el equilibrio térmico, las transiciones de subida y bajada deben ser iguales:

$$AN_2 + BN_2\rho_{em} = B'N_1\rho_{em} \quad (5.1.3)$$

Utilizando la ecuación (5.1.2) en la (5.2.3) se tiene que la densidad espectral de energía ρ_{em} es:

$$\rho_{em} = \frac{A/B}{\frac{B'}{B}\exp(hf/k_B T) - 1} \quad (5.1.4)$$

En equilibrio térmico, ρ_{em} debería ser idéntica a la densidad espectral de energía de radiación del cuerpo negro dada por la fórmula de Planck [2]

$$\rho_{em} = \frac{8\pi hf^3/c^3}{\exp(hf/k_B T) - 1} \quad (2.1.5)$$

La comparación de las ecuaciones (5.1.4) y (5.1.5) da por resultado las siguientes relaciones:

$$A = (8\pi f^3/c^3)B; \quad B' = B \quad (5.1.6)$$

Estas relaciones fueron obtenidas por Albert Einstein, y es por ello que A y B reciben el nombre de coeficientes de Einstein [1], [2].

Es posible obtener dos conclusiones importantes de las ecuaciones (5.1.1) a la (5.1.6): En primer lugar, $R_{emi\ espont}$ puede exceder considerablemente tanto a $R_{emi\ estim}$ como a R_{absor} si $k_B T > hf$. Las fuentes térmicas operan bajo este régimen. En segundo lugar, para la radiación en el espectro visible o en la región infrarroja cercana ($hf = 1$ eV), la emisión espontánea es dominante en comparación con la emisión estimulada en equilibrio térmico a temperatura ambiente ($k_B T \approx 25$ meV) porque:

$$\frac{R_{emi\ estim}}{R_{emi\ espont}} = \frac{1}{\exp(hf/k_B T) - 1} \quad (5.1.7)$$

Por lo tanto, todos los láseres existentes deben operar fuera de equilibrio térmico, lo cual se logra bombeando al láser con una fuente externa de energía.

Incluso para sistemas atómicos bombeados externamente la emisión estimulada puede no ser el proceso dominante ya que debe competir con el proceso de absorción. $R_{emi\ espont}$ puede ser mayor que R_{absor} sólo cuando $N_2 > N_1$. Esta condición se conoce como inversión de población; constituye un prerrequisito para la existencia del efecto láser y no es posible alcanzarlo en equilibrio térmico, como puede concluirse de la ecuación (5.1.2). En sistemas atómicos la inversión de población se logra al utilizar esquemas de bombeo de tres y cuatro niveles [2] de tal manera que la fuente externa de energía eleve

la población atómica del estado basal a un estado excitado ubicado por encima del nivel de energía E_2 de la figura 5.1.

La tasa de emisión y absorción en los semiconductores dependen de las bandas de energía asociadas al material. La figura 5.2 muestra de manera esquemática el proceso de emisión utilizando la estructura de bandas más simple, que consiste en bandas parabólicas de conducción y de valencia en el espacio energía- vector de onda (diagrama E-k) [1], [2]. La emisión espontánea sólo puede ocurrir si el estado de energía E_2 es ocupado por un electrón y el estado de energía E_1 está vacío (esto es, ocupado por un hueco). La probabilidad de ocupación por electrones de la banda de conducción y de valencia están dadas por las distribuciones de Fermi-Dirac:

$$f_{er.}(E_2) = \frac{1}{1 + \exp((E_2 - E_{fc})/k_B T)} \quad (5.1.8)$$

$$f_{er.}(E_1) = \frac{1}{1 + \exp((E_2 - E_{fv})/k_B T)} \quad (5.1.9)$$

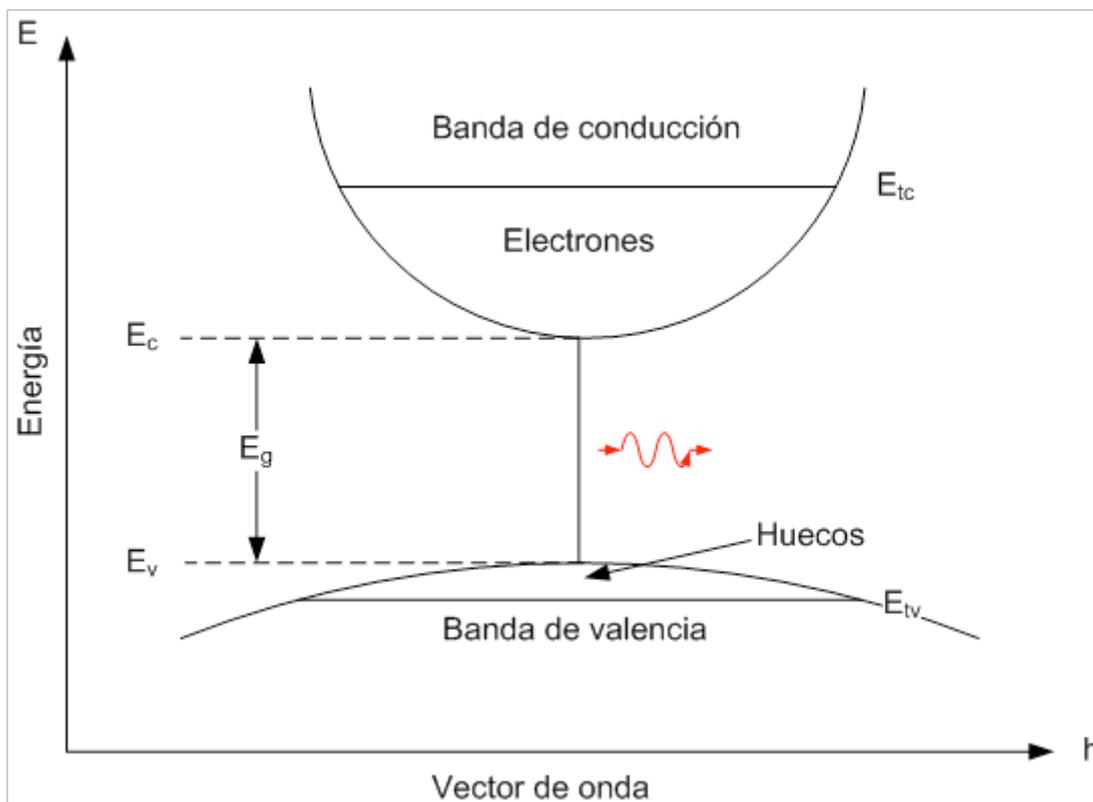


Figura 5.2 Bandas de conducción y valencia de un semiconductor. Los electrones de la banda de conducción y los huecos de la banda de valencia pueden recombinarse y emitir fotones tanto por emisión espontánea como por emisión estimulada [1].

Donde E_{fc} y E_{fv} son llamados cuasiniveles de Fermi [2], [3]. La tasa total de emisión espontánea a la frecuencia ω se obtiene a partir de la suma de todas las posibles transiciones entre las dos bandas tales que $E_2 - E_1 = hf = h\omega$ donde $\omega = 2\pi f$, $h = h/2\pi$ y E_{em} es la energía del fotón emitido. El resultado es:

$$R_{emi\ espont}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) fer_c(E_2)[1 - fer_v(E_1)]\rho_{cv}dE_2 \quad (5.1.10)$$

donde $\rho_{em}(\omega)$ es la densidad conjunta de estados, definida como el número de estados por unidad de volumen por unidad de rango energético, y está dada por [2]:

$$\rho_{cv} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 h^3} (h\omega - E_g)^{1/2} \quad (5.1.11)$$

En la ecuación anterior E_g es la banda de energía prohibida y m_r es la masa reducida, definida como $m_r = m_c m_v / (m_c + m_v)$ siendo m_c y m_v las masas efectivas de los electrones y los huecos en las bandas de conducción y de valencia, respectivamente. Ya que ρ_{cv} es independiente de E_2 , puede considerarse una constante y factorizarla como tal en la integral de la ecuación (5.1.10). En contraste, $A(E_1, E_2)$ generalmente depende de los valores de E_2 y está relacionada con el elemento matriz de momentos del modelo semiclásico de perturbaciones utilizado para calcularlo [4].

La tasa de emisión estimulada y de absorción pueden ser obtenidas de manera similar y están dadas por:

$$R_{emi\ estim}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) fer_c(E_2)[1 - fer_v(E_1)]\rho_{cv}\rho_{em}dE_2 \quad (5.1.12)$$

$$R_{absor}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) fer_v(E_1)[1 - fer_c(E_2)]\rho_{cv}\rho_{em}dE_2 \quad (5.1.13)$$

donde $\rho_{em}(\omega)$ es la densidad espectral de fotones, presentada de una manera similar a la ecuación (5.1.1). La condición para inversión de población $R_{emi\ estim} > R_{absor}$ se obtiene al comparar las ecuaciones (5.1.8) y (5.1.9) puede demostrarse que esta condición es satisfecha cuando:

$$E_{fc} - E_{fv} \geq E_2 - E_1 \geq E_g \quad (5.1.14)$$

Ya que el valor mínimo de $E_2 - E_1$ es igual a E_g , la separación entre los cuasiniveles de Fermi debe ser mayor que la banda prohibida para que pueda presentarse la inversión de población [1], [2]. En el equilibrio térmico ambos cuasiniveles de Fermi coinciden ($E_{fc} = E_{fv}$). Dichos cuasiniveles pueden separarse bombeando energía proveniente de una fuente externa hacia el semiconductor; la manera más conveniente de bombear un semiconductor es utilizando una unión p-n directamente polarizada [1], [3].

5.2 Diodos emisores de luz (LED)

Una unión p – n en polarización directa emite luz por medio de emisión espontánea, fenómeno que se conoce como electroluminiscencia. Un LED, en su forma más simple,

es una homounión p- n polarizada directamente. Las recombinaciones radiantes electrón – hueco que se llevan a cabo en la región de agotamiento generan luz; parte de ella escapa en el dispositivo y es posible introducirla (acoplarla) en una fibra óptica. La luz emitida es incoherente con una anchura espectral relativamente amplia (entre 30 y 60 nm) y una dispersión angular relativamente alta [1].

5.2.1 Características de potencia y corriente

Con una corriente determinada I , la tasa de inyección de portadores es I/q . En el estado estable, la tasa de recombinaciones electrón – hueco a través de procesos tanto radiantes como no radiantes es igual a la tasa de inyección de portadores I/q . La tasa de generación de fotones $\eta_{int}I/q$ puesto que η_{int} determina la fracción de los pares electrón – hueco que se recombina a través de emisión espontánea. La potencia óptica interna es por lo tanto:

$$P_{int} = \eta_{int} I \frac{h\omega}{q} \quad (5.2.1)$$

donde $h\omega$ es la energía del fotón, suponiendo que es casi la misma para todos los fotones. Si se define a η_{ext} como la fracción de fotones que se escapan del dispositivo, la potencia emitida es:

$$P_{ext} = \eta_{ext} P_{int} = \eta_{ext} \eta_{int} I \frac{h\omega}{q} \quad (5.2.2)$$

La cantidad η_{ext} es conocida como eficiencia cuántica externa, y puede ser calculada tomando en cuenta la absorción interna y la reflexión total interna en la interfaz semiconductor – aire. Como puede observarse en la figura 5.3 solamente puede escapar la luz emitida dentro de un cono de ángulo θ_c , donde $\theta_c = \text{angsen}(1/n)$ es el ángulo crítico y n es el índice de refracción del semiconductor. La absorción interna puede evitarse utilizando LEDs de heteroestructura, en los cuales las capas de revestimiento que rodean a la región activa son transparentes para la radiación generada. La eficiencia cuántica externa puede entonces ser escrita como:

$$\eta_{ext} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\theta_c} 2\pi \text{sen}(\theta) T_f(\theta) d\theta \quad (5.2.3)$$

donde T_f es la transmitividad de Fresnel, dependiente del ángulo de incidencia θ , y se ha asumido que la radiación se emite con simetría esférica (uniformemente con un ángulo sólido de 4π sr). En el caso de incidencia normal, $T_f(0) = 4n/(n+1)^2$. Si se reemplaza $T_f(\theta)$ por $T_f(0)$ por simplicidad en la ecuación (5.2.3), η_{ext} es aproximadamente:

$$\eta_{ext} = \frac{1}{n(n+1)^2} \quad (5.2.4)$$

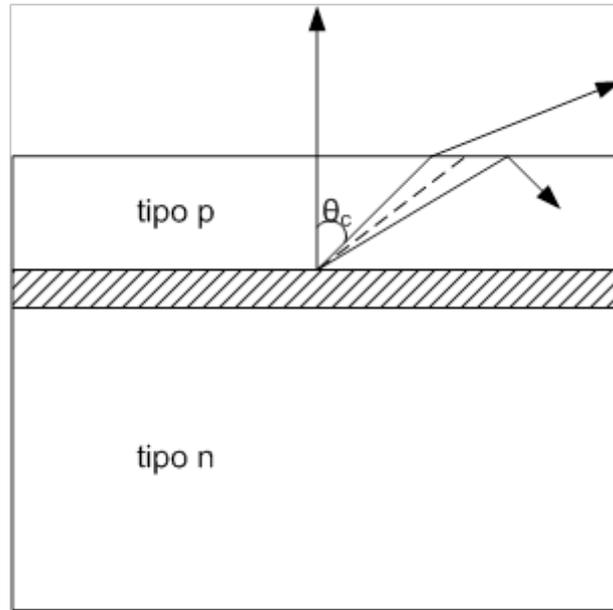


Figura 5.3 Reflexión total interna en la cara de salida de un LED. Solo la luz emitida dentro de un cono de ángulo θ_c es transmitida, donde θ_c es el ángulo crítico de la interfaz semiconductor – aire [1].

Utilizando la ecuación (5.2.4) en la (5.2.2) se obtiene la potencia emitida a través de una faceta. Se presentan pérdidas posteriores en la potencia de salida cuando la luz emitida tiene que ser introducida en la fibra óptica (pérdidas por acoplamiento). Debido a la naturaleza incoherente de la luz emitida, los LEDs se comportan como fuentes lambertianas de distribución angular $S(\theta) = S_0 \cos(\theta)$, donde S_0 es la intensidad en la dirección $\theta = 0$. Es posible demostrar que la eficiencia de acoplamiento de este tipo de fuentes es [5] $\eta_{ac} = (AN)^2$, donde AN es la apertura numérica de la fibra óptica, cuyos valores típicamente se encuentran en el rango de 0.1 a 0.3, implicando por lo tanto que solo una pequeña fracción de la potencia emitida sea acoplada a la fibra. Normalmente la potencia lanzada de un LED a una fibra es de 100 μW o menor, aun cuando la potencia interna puede exceder fácilmente los 10 mW.

Una medida del desempeño de un LED es la eficiencia cuántica total, denotada por η_{tot} , que se define como la relación entre la potencia óptica emitida $P_{opt\ emi}$ y la potencia óptica aplicada, $P_{elec} = V_0 I$, donde V_0 es la diferencia de potencial en el dispositivo. Utilizando la ecuación (5.2.2):

$$\eta_{tot} = \frac{P_{opt\ emi}}{P_{elec}} = \frac{\eta_{ext} \eta_{int} I \frac{h\omega}{q}}{V_0 I} = \eta_{ext} \eta_{int} \frac{h\omega}{qV_0} \quad (5.2.5)$$

Generalmente $h\omega = qV_0$, de tal manera que $\eta_{tot} = \eta_{ext} \eta_{int}$. La eficiencia cuántica total, también conocida como eficiencia de conversión de potencia, es una medida del desempeño general del dispositivo.

Otro parámetro utilizado para caracterizar el desempeño de los LEDs es el de responsividad, definida como la razón entre la potencia óptica emitida y la corriente:

$$R_{LED} = \frac{P_{opt\ emi}}{I} = \eta_{ext}\eta_{int} \frac{h\omega}{q} \quad (5.2.6)$$

Comparando (5.2.5) y (5.2.6), es posible observar que $R_{LED} = \eta_{tot} V_0$. Los valores típicos de R_{LED} son de alrededor de 0.01 W/A. La responsividad se mantiene constante siempre y cuando la relación entre la potencia óptica emitida y la corriente sea lineal.

5.2.2 Espectro de un LED

El espectro de una fuente luminosa afecta el desempeño de los sistemas ópticos de telecomunicaciones debido a una dispersión en la fibra. El espectro del LED está emparentado con el espectro de emisión espontánea, $R_{emi\ espont}(\omega)$, dado por (5.1.10). generalmente, el espectro $R_{emi\ espont}(\omega)$ se calcula numéricamente y depende de diversos parámetros del material. Sin embargo, es posible obtener una buena aproximación si se considera que $A(E_1, E_2)$ es diferente de cero para un rango estrecho de valores de energía alrededor del valor de energía del fotón, y si las funciones de Fermi son aproximadas por sus flancos exponenciales bajo el supuesto de que la inyección es débil, el resultado es [1]:

$$R_{emi\ espont}(\omega) = A_0 \sqrt{h\omega - E_g} \exp\left[-\frac{(h\omega - E_g)}{k_B T}\right] \quad (5.2.7)$$

donde A_0 es una constante y E_g es la banda prohibida de energía.

En la práctica, la anchura espectral se expresa en unidades de nanómetros o micrómetros tomando en cuenta que:

$$|\Delta\lambda| \approx \left|(-\lambda^2/c)\Delta f\right| \quad (5.2.8)$$

Como puede observarse en la expresión anterior, $\Delta\lambda$ crece de manera proporcional al cuadrado de la longitud de onda al aumentar ésta, y es por ello que $\Delta\lambda$ es mayor por un factor cercano a 2 para LEDs de GaAsP que emiten a $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$. El parámetro BL se ve considerablemente limitado por la dispersión de la fibra en sistemas ópticos donde se utilizan LEDs como fuentes ópticas debido a su gran anchura espectral ($\Delta\lambda$ puede ser de 50 a 60 nm). Los LEDs son adecuados principalmente para redes de área local con tasas de transmisión de 10 a 100 Mb/s y distancias de transmisión de pocos kilómetros.

5.2.3 Respuesta a la modulación

LA respuesta de los LEDs a la modulación depende de la dinámica de los portadores a través del tiempo de vida de éstos últimos, τ_c , la cual representa el tiempo total de recombinación de los portadores de carga en ausencia de recombinación estimulada, y está definida por la relación:

$$R_{emi\ espont} + R_{nr} = \frac{N}{\tau_c} \quad (5.2.9)$$

donde N es la densidad de portadores. La respuesta a la modulación puede determinarse utilizando una ecuación de tasa para la densidad N de portadores. Ya que los electrones

y los huecos se inyectan y se recombinan en pares, es suficiente considerar la ecuación de tasa únicamente para uno de los dos tipos de portadores de carga. Dicha ecuación de tasa debe incluir todos los mecanismos a través de los cuales los electrones aparecen y desaparecen de la región activa. Para los LEDs, en los cuales es despreciable la emisión estimulada, toma la siguiente forma:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} \quad (5.2.10)$$

donde V es el volumen de la región activa. El último término de (5.2.10) toma en cuenta tanto el proceso de recombinación radiante como el no radiante a través de τ_c . Considerando una modulación senoidal de la corriente de inyección representada de manera fasorial por:

$$I(t) = I_b + I_m \exp(j\omega_m t) \quad (5.2.11)$$

donde I_b es la corriente de polarización, I_m es la amplitud máxima de la corriente de modulación y ω_m es la frecuencia de modulación. Ya que la ecuación diferencial (5.1.10) es lineal, su solución general puede tomar la forma:

$$N(t) = N_b + N_m \exp(j\omega_m t), \quad (5.2.12)$$

$$N_b = \frac{\tau_c I_b}{qV}, \quad (5.2.13)$$

$$N_m(\omega_m) = \frac{\tau_c I_m / qV}{1 + j\omega_m \tau_c} \quad (5.2.14)$$

La potencia modulada P_{in} está relacionada linealmente con $|N_m|$. Es posible definir la función de transferencia del LED como:

$$H(\omega_m) = \frac{N_m(\omega_m)}{N_m(0)} = \frac{1}{1 + j\omega_m \tau_c} \quad (5.2.15)$$

El ancho de banda a -3 dB del LED se define como la frecuencia de modulación para la cual $|H(\omega)|$ se reduce a la mitad de su valor máximo, lo cual ocurre para:

$$\omega_{m_{3db}} = \frac{\sqrt{3}}{\tau_c} \Rightarrow f_{m_{3db}} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \tau_c} \quad (5.2.16)$$

5.2.4 Estructuras de LEDs

Los LEDs pueden clasificarse según su estructura en LEDs de emisión superficial o de emisión lateral (emisión de borde), dependiendo de si el LED emite luz desde la superficie paralela al plano de la unión o del borde de la región de unión, respectivamente. Ambos tipos de LEDs pueden fabricarse empleando diseños basados en homouniones p-n o en heteroestructuras en las que la región activa está rodeada por

capas de revestimiento. Éstos últimos tienen un mejor desempeño, ya que proveen un control del área de emisión y elimina la absorción interna gracias a la transparencia de las capas de revestimiento.

La figura 5.4 muestra el esquema de un LED de emisión superficial conocido como LED tipo Burrus. El área de emisión del dispositivo está restringida a una pequeña región cuya dimensión lateral es comparable con el diámetro del núcleo de una fibra óptica. El uso de un borne de oro reduce pérdidas de potencia en la superficie inferior. La eficiencia de acoplamiento es mejorado grabando un pozo y acercando la fibra al área de emisión. La potencia acoplada a la fibra depende de muchos parámetros, como la apertura numérica de la fibra y la distancia entre la fibra y el LED.

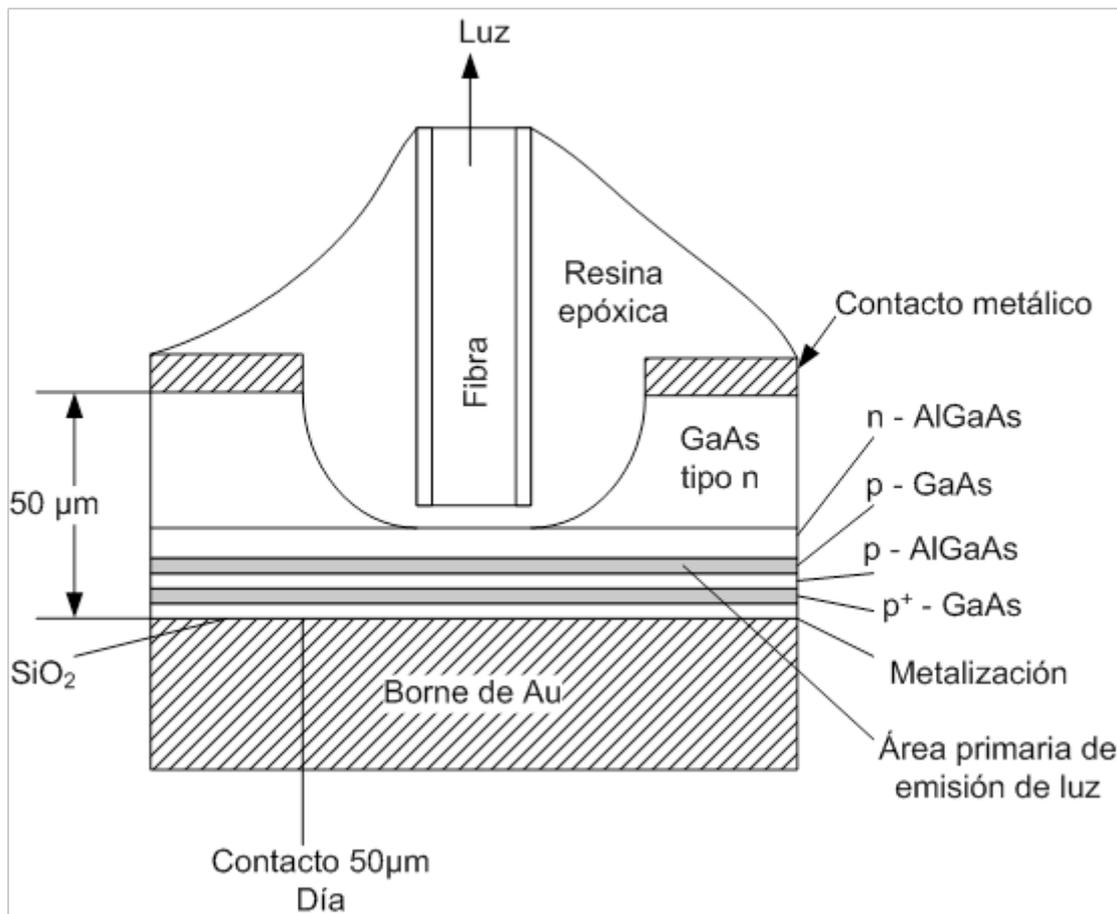


Figura 5.4 Esquema de un LED de emisión superficial con geometría de heteroestructura doble [1].

Los LEDs de emisión de borde emplean un diseño usado comúnmente en láseres semiconductores. De hecho, un láser semiconductor se convierte en un LED al depositar un recubrimiento antirreflejante en su cara de salida para evitar que se presente el efecto láser. La divergencia del haz de los LEDs de emisión de borde difiere de la de los LEDs de emisión superficial debido a que se presenta un efecto de guía de ondas en el plano perpendicular a la unión. Los LEDs de emisión superficial se comportan como una fuente lambertiana con una distribución $S_e(\theta) = S_0 \cos(\theta)$ en varias direcciones axiales. La divergencia de haz resultante tiene una anchura total a la mitad de su máximo de 120° en cada dirección axial. En cambio, los LEDs de emisión de borde presentan una divergencia de aproximadamente 30° en la dirección perpendicular al plano de unión. El ancho de banda de modulación de los LEDs de

emisión de borde es mayor (de alrededor de 200 MHz) que el de los LEDs de emisión superficial, debido al menor tiempo de vida de los portadores de carga para un mínimo valor de corriente eléctrica [6]. En la práctica, la elección del tipo de LED a utilizar depende de la relación entre costo y desempeño.

5.3 Diseño e implementación de circuitos con LEDs

5.3.1 Optoacopladores

Objetivos:

1. Observar el comportamiento de los diodos luminiscentes (LEDs)
2. Comprender el principio de funcionamiento de los optoacopladores.

Preludio:

La optoelectrónica es una tecnología que combina la óptica y la electrónica. A este campo pertenecen los diodos emisores de luz (LEDs), las pantallas o displays y los optoacopladores.

Los LEDs

El diodo emisor de luz, LED, es una fuente luminosa de estado sólido. Los LED han reemplazado a los focos en diversas aplicaciones debido a las siguientes ventajas:

1. Consumen poco voltaje
2. Su vida útil es muy larga (más de 20 años)
3. Su tiempo de conmutación es muy breve (nanosegundos, ns)

En los diodos rectificadores de polarización directa, los electrones libres y los huecos se recombinan en la unión. Cuando un electrón libre cae en un hueco, desciende de un nivel de energía mayor a uno menor. Conforme esto sucede, el electrón radia energía en forma de luz y calor. Como el silicio es opaco, no es posible que la luz irradie hacia el exterior.

El caso del LED es diferente. En primer lugar, al fabricarlo se utilizan materiales transparentes en lugar de silicio, y en un LED con polarización directa, se irradia calor y luz cuando los electrones libres y los electrones se recombinan en la unión.

Como el material es semitransparente, parte de la luz se irradia al medio externo. El símbolo esquemático de un LED se muestra en la figura 5.5.

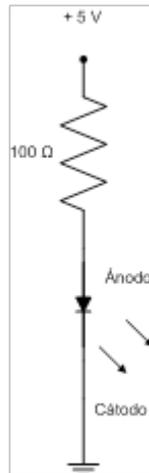


Figura 5.5. LED polarizado directamente

Mediante elementos tales como el galio, el arsénico y el fósforo, se producen LEDs que radian luz roja, verde, amarilla, ámbar o infrarroja. Los LEDs que producen radiación visible se utilizan en pantallas de instrumentos, calculadoras y relojes digitales. El LED infrarrojo se utiliza en sistemas contra robo y en otras áreas que requieren de radiación invisible.

La caída de voltaje característica de los LEDs es de 1.5 a 2.5 V para corrientes de entre 10 y 40 mA. La caída de voltaje exacta dependerá del color, tolerancia y otros factores. Para realizar un análisis y diseño preliminares se recurre a la segunda aproximación de un diodo con una tensión mínima de activación de 2 V.

El valor de la especificación del voltaje inverso es baja; es decir, si se aplica un voltaje inverso mayor se podrían destruir o degradar las características del LED. Una manera de proteger el LED es conectar en paralelo un diodo rectificador, como el de la figura 5.6. El voltaje de barrera del diodo rectificador de 0.7 V evita que el voltaje inverso del LED rebase este valor.

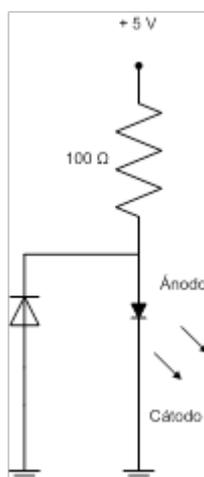


Figura 5.6. Protección de un LED contra polarización inversa

Fotodiodos

La corriente de un diodo con polarización inversa es pequeña debido a sus portadores minoritarios. La cantidad de éstos dependerá de la temperatura y de la luz que incida en la unión. Cuando la base de un diodo es opaca, la luz externa no llega a la unión; por lo tanto, no se detecta ningún efecto fotoeléctrico (transformación de la luz en electricidad). En cambio, si la base del diodo es de vidrio, la luz que entra modifica la cantidad de corriente inversa.

Los fotodiodos son óptimos por su sensibilidad a la luz. En estos diodos, una ventana de vidrio permite que la luz pase a través de la base y llegue a la unión. La luz incidente produce electrones libres y huecos; es decir, la luz aumenta la cantidad de portadores minoritarios. Cuanto más intensa sea la luz, mayor será la cantidad de portadores minoritarios producidos.

En la figura 5.7 se muestra el símbolo esquemático de un fotodiodo; las flechas que entran representan la luz que se incide. Se observa también que la polarización del fotodiodo es inversa. De esta manera, si la intensidad luminosa aumenta, la corriente inversa se incrementa. Ésta es pequeña, en general, décimas de microampères.

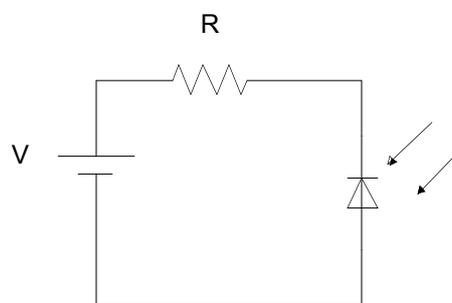


Figura 5.7. Fotodiodo con polarización inversa

El fotodiodo es un ejemplo de fotodetector, dispositivos capaz de convertir la luz que incide en electricidad.

Optoacopladores

Un optoacoplador combina, en una misma base, un LED y un fotodetector. La figura 5.8 muestra un acoplador formado por un LED y un fotodiodo: el primero está a la izquierda y el segundo a la derecha. El voltaje que alimenta al LED fuerza la circulación de la corriente a través del LED. La luz que éste emite incide en el fotodiodo y crea una corriente inversa que pasa por el resistor R_2 . El voltaje del fotodiodo es:

$$V_{sal} = V_{SS} - IR_2$$

este voltaje de salida dependerá de la magnitud de la corriente inversa. Si se modifica el voltaje que alimenta al LED, varían la intensidad luminosa, la corriente del fotodiodo y, en consecuencia, V_{sal} . Si la corriente del LED tiene una variación de ca, V_{sal} tendrá la misma variación de ca.

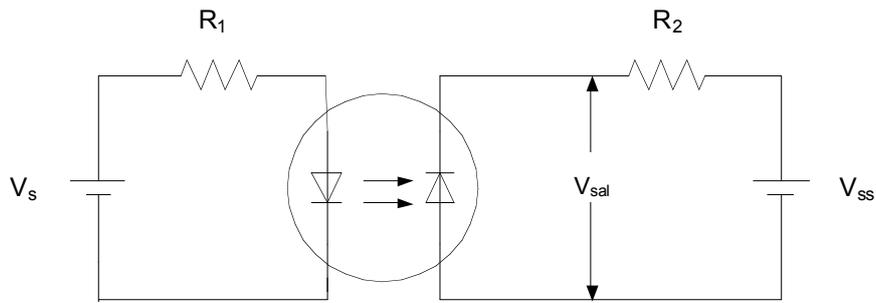


Figura 5.8. Circuito optoacoplador

La principal ventaja del optoacoplador es el aislamiento eléctrico entre el circuito del LED y el circuito del fotodiodo; es común que la resistencia entre el circuito de entrada y el de salida sea mayor a los $10^{10} \Omega$. Por ello, el optoacoplador también se conoce como “optoaislador”, el único contacto entre los circuitos de entrada y de salida es el haz luminoso.

Material

- 2 fuentes de alimentación variable, al menos de 1 q 15 V
- Multímetro
- 2 resistores de 270Ω , 1 W
- 1 dodo 1N914 (o diodo de señal pequeña equivalente)
- 1 LED
- Optoacoplador 4N26 (o su equivalente más cercano)

Procedimiento

Actividad 1. Protección del LED.

1. Revisar el LED rojo. Se observa que un lado de la base tiene un extremo plano, aquí se encuentra el cátodo (en muchos LEDs la conexión del cátodo es ligeramente más corta que la del ánodo. Ésta es otra manera de identificar al cátodo)
2. Armar el circuito de la figura 5.9 utilizando un LED. El osciloscopio mide el voltaje del LED. El 1N914 protege al LED contra aplicación accidental de un voltaje inverso.

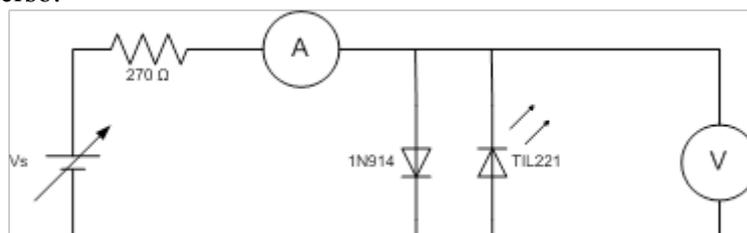


Figura 5.9. Circuito para los datos de un LED

3. De la misma manera, conectar un LED sin el diodo de protección.

4. Ajustar el voltaje de la fuente, V_S , aumentando el valor de 5 en 5 V. Anotar la lectura de los LEDs en la tabla 5.1.

V_{fuente} [V]	$V_{\text{c/protec.}}$ [V]	$V_{\text{s/protec.}}$ [V]
0		
5		
10		
15		

Tabla 5.1. Datos del LED

Actividad 2. Optoacoplador

1. Armar el circuito de la figura 5.10. Ajustar la fuente de voltaje a la salida en 5V. Variar el voltaje de entrada según la tabla 5.2. Medir y anotar el voltaje de salida en la tabla 5.2.

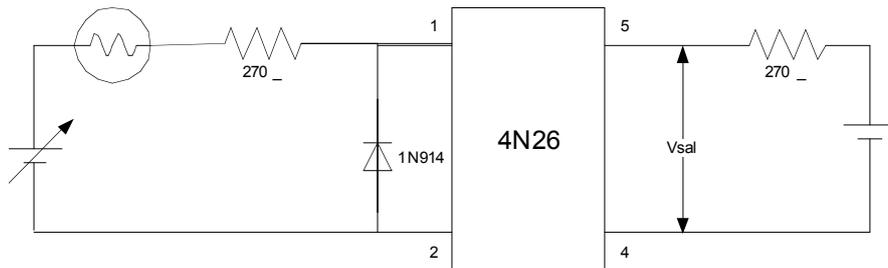


Figura 5.10. Optoacoplador

V_S [V]	$V_{\text{sal.}}$ [V]
0	
2	
4	
6	
8	
10	
12	
14	

Tabla 5.2. Optoacoplador

2. Trazar la gráfica de transferencia, V_{sal} , en función de V_S , del optoacoplador con los datos de la tabla 5.2 en una gráfica.

Desarrollo

Actividad 1. Protección del LED.

Se arma el circuito de protección del led, y por otra parte se permite a un led conectarse si protección.

Para objeto de observar los cambios de voltaje en ambos casos se conecta el voltaje del led con protección al canal 0 del osciloscopio NI-SCOPE, y el voltaje del led 2 al canal 1 de dicho osciloscopio.

Las observaciones realizadas se muestran a continuación:

Vfuente [V]	V_{c/protec.} [V]	V_{s/protec.} [V]
0	0	0
5	1.980	1.952
10	2.265	2.222
15	2.479	2.536

Tabla 5.3. Datos del LED

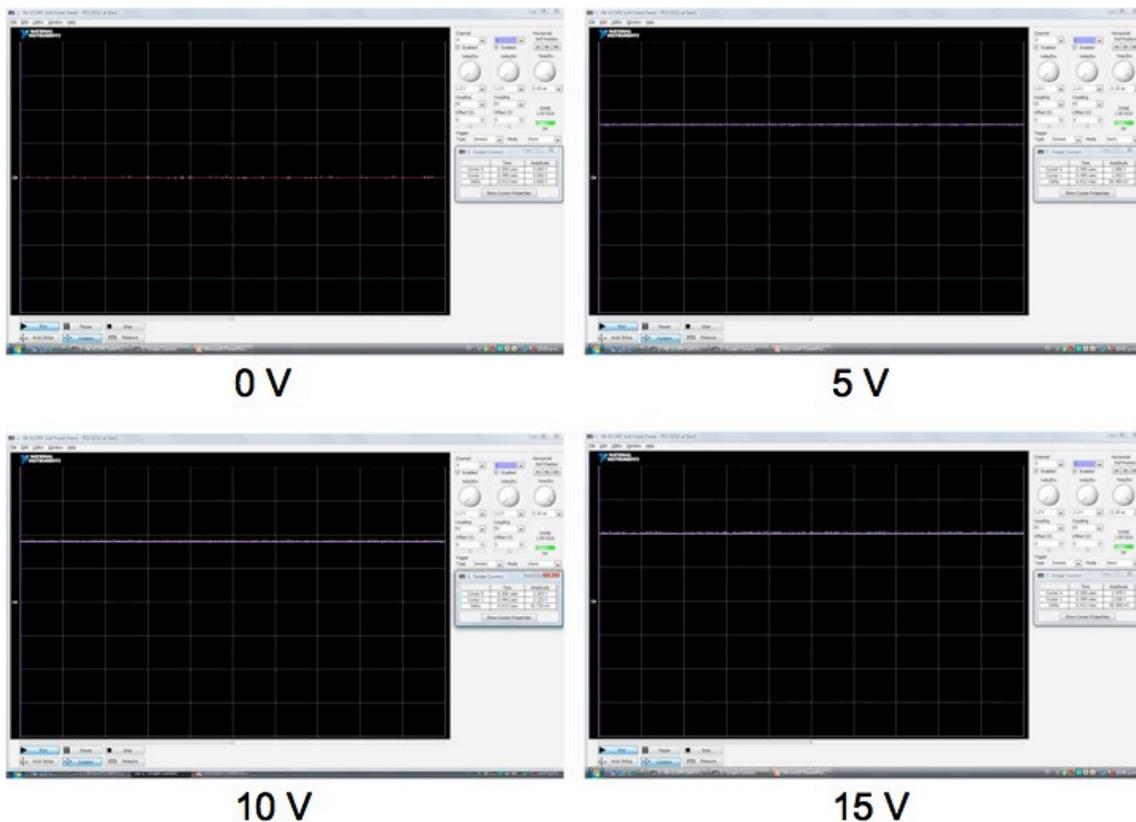


Figura 5.11. Observaciones de ambos casos bajo diferentes voltajes.

De los resultados observados, se puede decir que en ambos casos los valores de voltaje permanecieron muy cercanos; sin embargo, cabe mencionar que la protección hecha al led es contra voltajes inversos, y dicha consideración no debe tener mayor manifestación sobre el desempeño del led, tal como se pudo observar en los resultados.

Actividad 2. Optoacoplador

Una vez armado el circuito, y ajustado el voltaje a la salida, se varió el voltaje de entrada de dos en dos volts hasta llegar a catorce volts. Los resultados de dicho experimento se muestran a continuación:

V_s [V]	$V_{sal.}$ [V]
0	5.008
2	4.466
4	2.515
6	1.461
8	1.190
10	1.019
12	0.877
14	0.805

Tabla 5.4. Optoacoplador.

Para realizar la gráfica que describa el comportamiento mostrado en la tabla anterior, empleamos Excel para obtener dicho trazo:

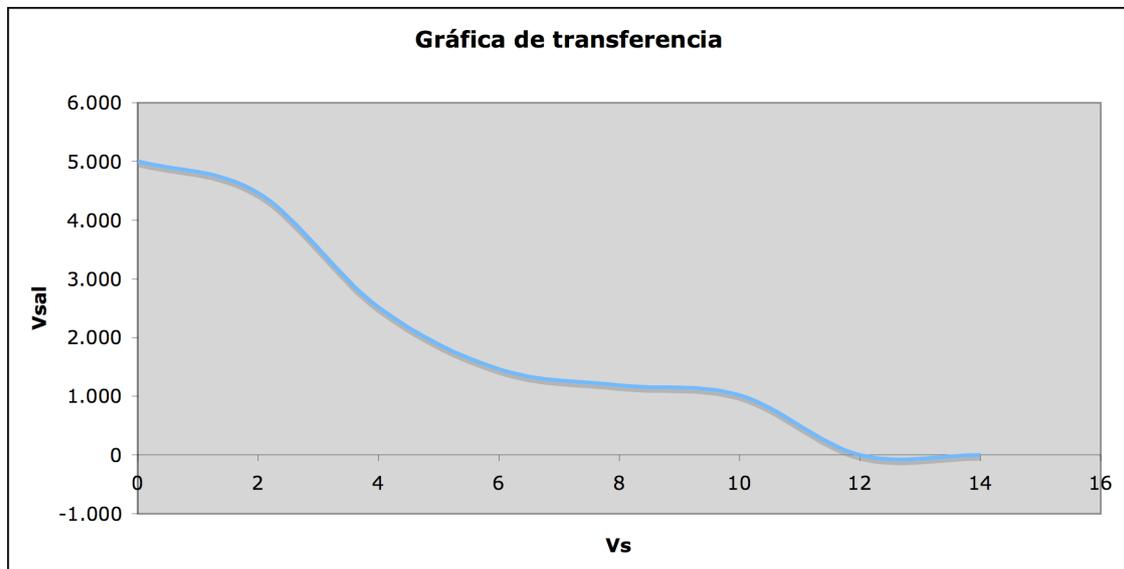


Figura 5.12. Gráfica de la transferencia de voltaje en el optoacoplador.

Mientras que las observaciones en el osciloscopio fueron las siguientes:

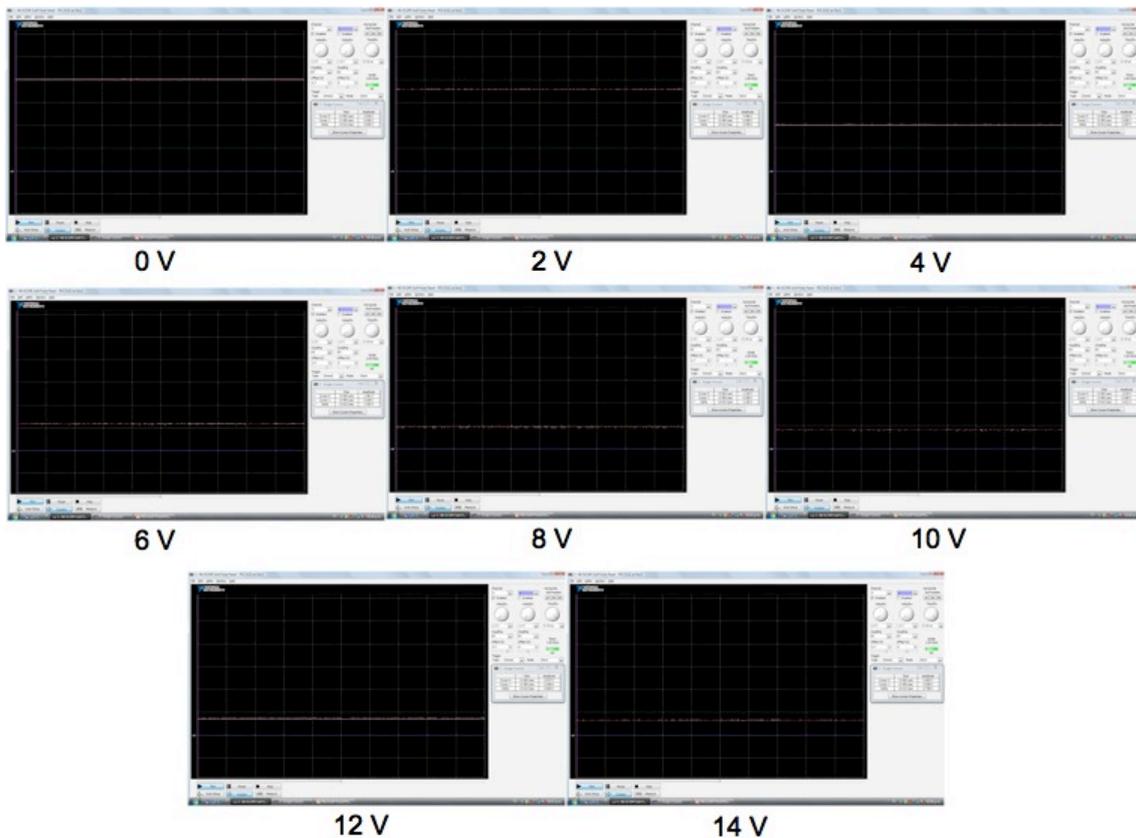


Figura 5.13. Voltaje de salida ante las variaciones del voltaje de entrada.

En los resultados obtenidos, se marca un comportamiento en la entrada y la salida del optoacoplador, la cual es, que al incrementar el voltaje de entrada disminuye el voltaje a la salida. Dicho efecto marca la característica del optoacoplador, que hace las veces de aislador entre etapas.

5.3.2 Circuito limitador de corriente para un LED.

Objetivos:

1. Comprender la importancia de limitar la corriente a un LED.
2. Implementar un circuito limitador de corriente para un LED.

Preludio:

Un LED es un diodo y como tal posee un cátodo y un ánodo y a diferencia de las lámparas incandescentes que están especificadas para una tensión de trabajo determinada, los leds están especificados para una corriente de trabajo determinada, que para un caso típico ronda en los 20 mA. Por lo que es necesario limitar esta corriente con una resistencia.

La forma de calcular dicha resistencia esta dada por la ley de Ohm por la siguiente formula:

$$R = \frac{(V - V_{led})}{I_{led}}$$

La resistencia esta expresada en Ohms, V_{led} es la tensión que cae en los extremos del led cuando circula una corriente (expresada en Amperes = I_{led}) típicamente es 1.5 V para un led infrarrojo, 1.8 V para un led rojo, 2.3 V para un led verde y 3.8 V para un LED azul (mayor tensión mientras mas elevada sea la frecuencia de emisión).

Material:

- 1 LED
- 1 resistencia de 1 k Ω
- 1 potenciómetro de 1 k Ω
- 1 fuente de alimentación de voltaje
- 1 generador de funciones
- 1 osciloscopio

Procedimiento

Actividad 1. Limitador de corriente con fuente de voltaje

1. Armar el circuito de la figura 5.14.

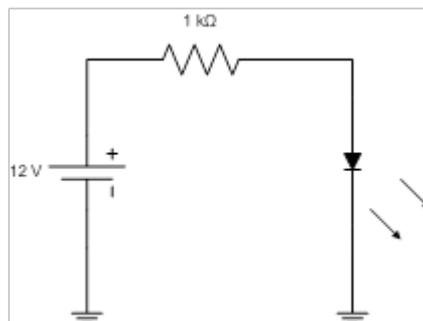


Figura 5.14. Limitador de corriente de un LED, con fuente de voltaje.

2. Observar el voltaje del LED en el osciloscopio. Compararlo con el voltaje de alimentación. Anotar dichas observaciones en la tabla 5.5.

V_{in} [V]	V_{LED} [V]

Tabla 5.5. Comparación de voltajes

3. Armar el circuito de la figura 5.15.

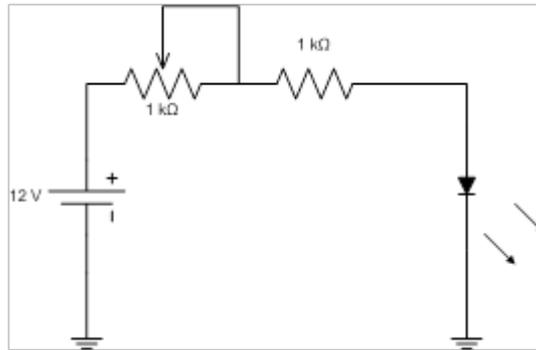


Figura 5.15. Limitador de corriente de un LED, con fuente de voltaje y potenciómetro.

4. Variar la resistencia en el potenciómetro. Anotar los valores correspondientes en la tabla 5.6.

R_{pot} [Ω]	V_{diodo} [V]
0	
250	
500	
750	
1000	

Tabla 5.6. Voltaje en el LED a través de las variaciones en el potenciómetro.

5. Realizar conclusiones respecto a los circuitos limitadores de corriente implementados con fuente de voltaje.

Actividad 2. Limitador de corriente con generador de funciones.

6. Armar el circuito de la figura 5.16.

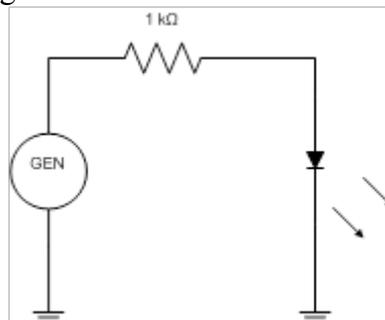


Figura 5.16. Limitador de corriente de un LED, con generador de funciones.

7. Conectar el canal 0 del osciloscopio a la señal de entrada y el canal 1 al voltaje del osciloscopio. Observar ambas señales.
8. Comparar el nivel entre la señal de entrada y el voltaje en el diodo. Anotar los resultados en la tabla 5.7.

$V_{señal}$ [V]	V_{LED} [V]

Tabla 5.7. Comparación de voltajes.

9. Graficar ambas señales.
10. Armar el circuito de la figura 5.17.

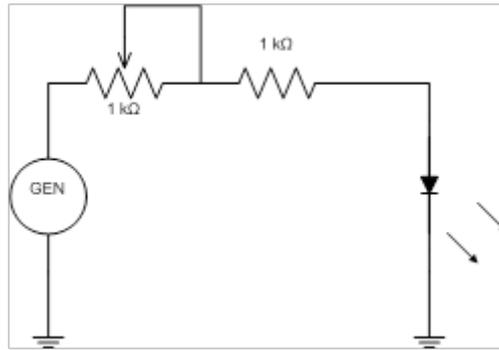


Figura 5.17. Limitador de corriente de un LED, con generador de funciones y potenciómetro

11. Conectar el canal 0 del osciloscopio a la señal de entrada y el canal 1 al voltaje del osciloscopio. Observar ambas señales.
12. Variar la resistencia del potenciómetro de acuerdo con la tabla 5.8. Anotar los resultados.

R_{pot} [Ω]	V_{diodo} [V]
0	
250	
500	
750	
1000	

Tabla 5.8. Voltaje del diodo a través de las variaciones en el potenciómetro.

13. Realizar conclusiones referentes al circuito limitador de corriente implementado con generador de funciones.

Desarrollo

Actividad 1. Limitador de corriente con fuente de voltaje

Para fines de realizar la observación del comportamiento del limitador de corriente se conectó el canal 0 del osciloscopio NI-SCOPE en el voltaje de alimentación y el canal 1 en el voltaje del led. Los resultados son como se muestran a continuación:

V_{in} [V]	V_{LED} [V]
9.002	1.950

Tabla 5.9. Comparación de voltajes

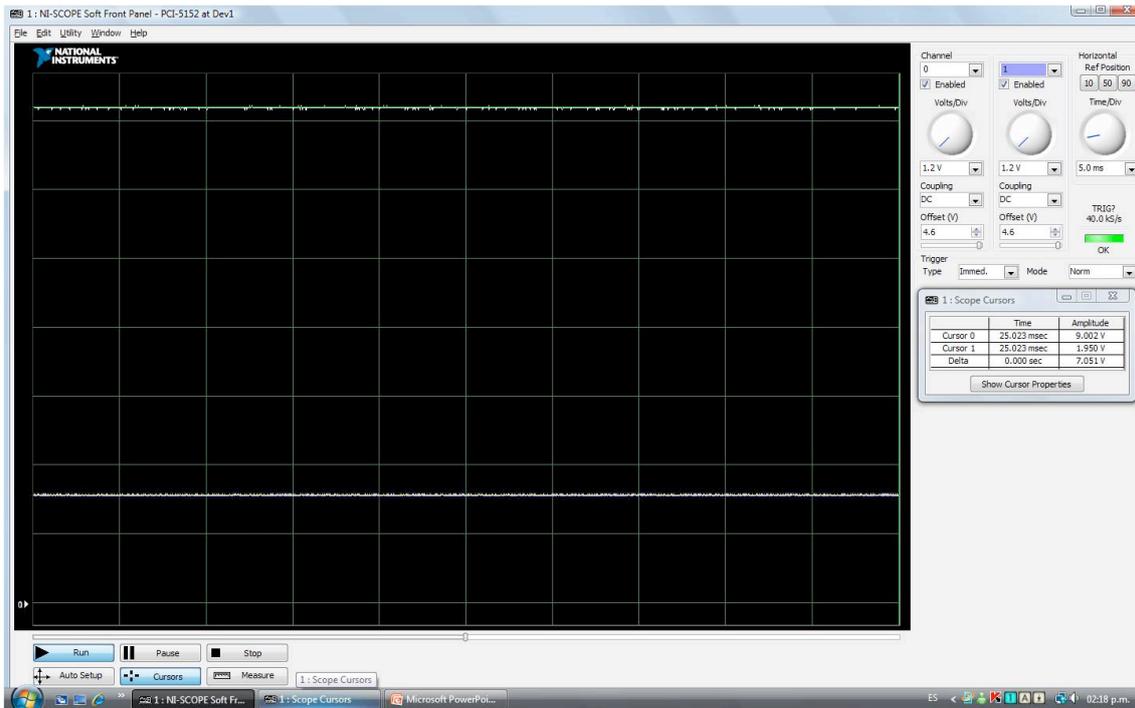


Figura 5.18. Comparación de voltajes.

En el caso del circuito limitador de corriente con potenciómetro, se observó lo siguiente:

R_{pot} [Ω]	V_{diodo} [V]
0	1.950
250	1.879
500	1.808
750	1.594
1000	0.042

Tabla 5.10. Voltaje en el LED a través de las variaciones en el potenciómetro.

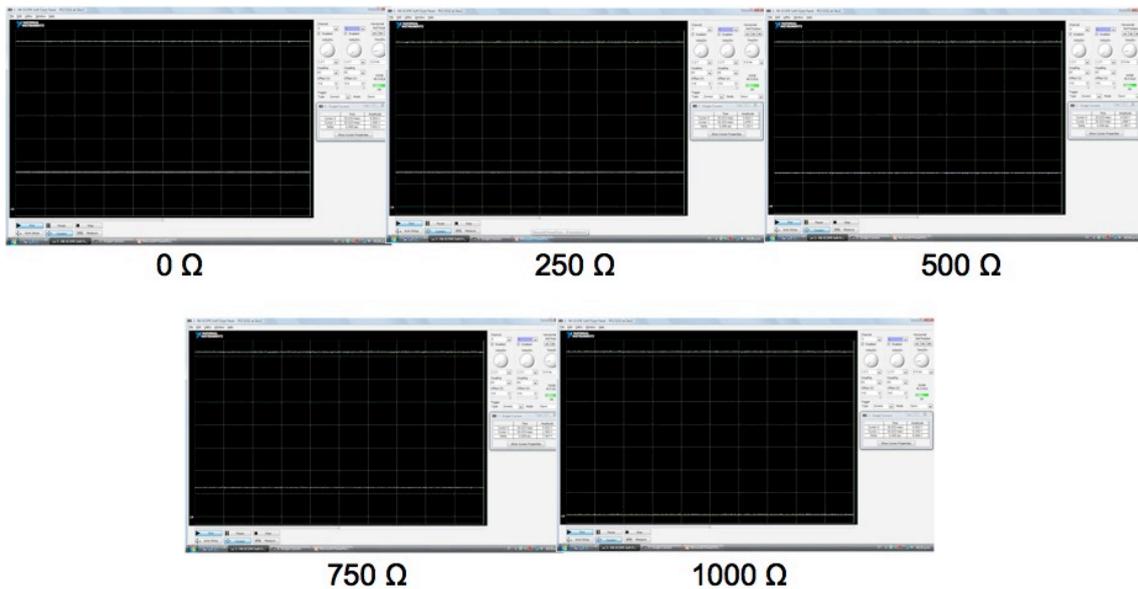


Figura 5.19. Voltaje en el diodo a través de las variaciones en el potenciómetro.

En general, se puede mencionar que los circuitos limitadores de corriente, en los cuales se empleó una fuente de voltaje como fuente de alimentación, nos ayudan a ajustar en nivel adecuado que brinde seguridad al dispositivo, en este caso el LED, y al mismo tiempo nos permita ofrecer diferentes tipos de intensidad luminosa, ya sea de manera fija, primer circuito; o variable, caso del potenciómetro.

Actividad 2. Limitador de corriente con generador de funciones.

Al igual que en el caso del limitador de corriente en el que se implementó una fuente de voltaje, en este caso se realizó la comparación entre el voltaje de alimentación, esta vez dado por un generador de funciones, y el voltaje manifestado en el led. Los resultados fueron los siguientes:

V_{señal} [V]	V_{LED} [V]
3.541	1.746

Tabla 5.11. Comparación de voltajes.

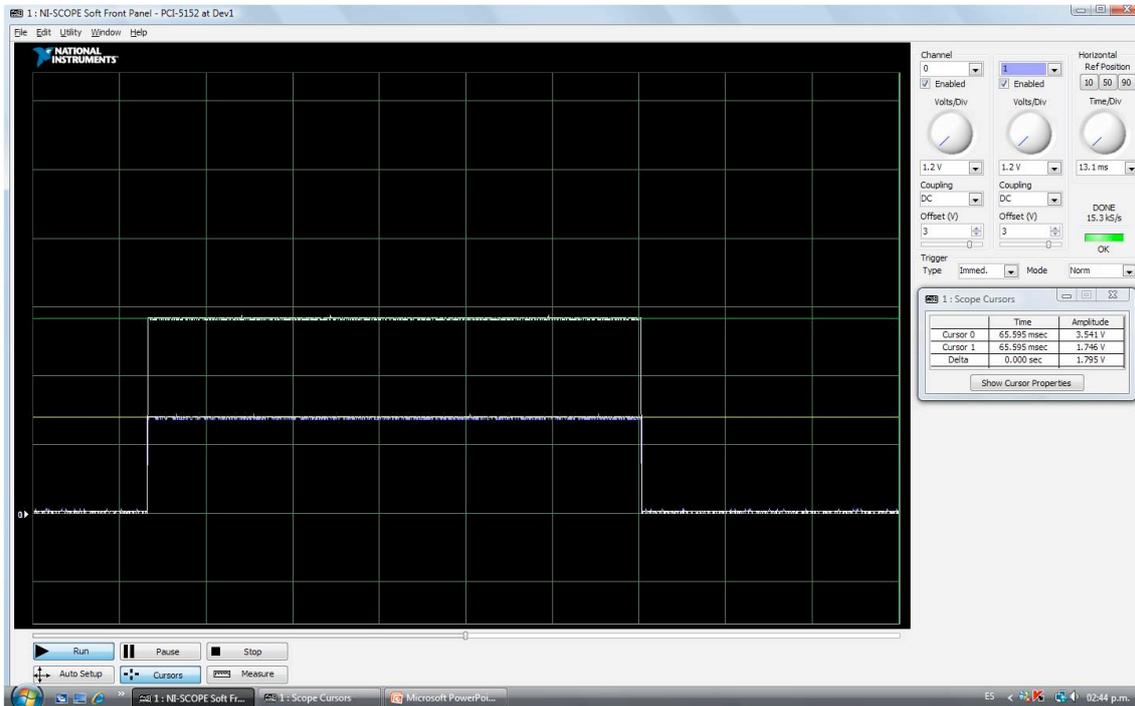


Figura 5.20. Comparación de voltajes.

Para el caso implementado con potenciómetro, se observó lo siguiente:

R_{pot} [Ω]	V_{diodo} [V]
0	1.746
250	1.675
500	1.575
750	0.664
1000	0.0234

Tabla 5.12. Voltaje del diodo a través de las variaciones en el potenciómetro.

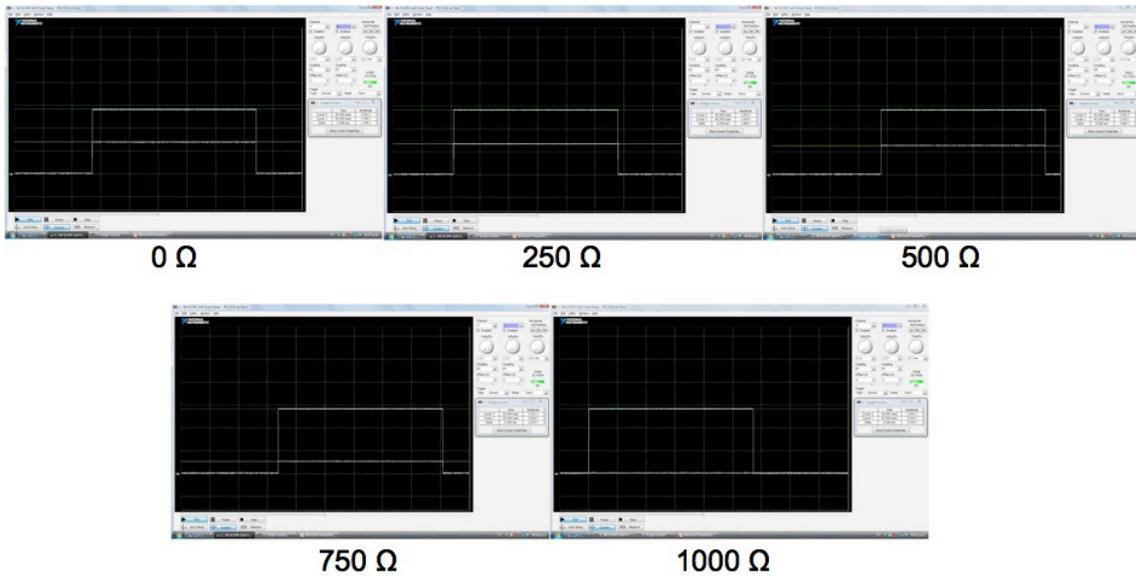


Figura 5.21. Voltaje en el diodo a través de las variaciones en el potenciómetro.

Al igual que en el caso en el que se tenía una fuente de voltaje como alimentación, en este caso es posible transmitir la cantidad de luz que nos sea más conveniente y al mismo tiempo proteger al diodo de recibir más corriente de la que puede recibir.

Bibliografia

- [1] Agrawal G. P. *Fiber – Optic Communication Systems*, 3ed, Wiley – Interscience, EUA, 2002
- [2] Saleh B. E. A., Teich M.C. *Fundamentals of Photonics*, Wiley-Interscience, EUA, 1991
- [3] Chiang S. L. *Physics of Optoelectronic Devices*, Wiley-Interscience, EUA, 1995
- [4] Agrawal G. P., Dutta N. K., *Semiconductor Lasers*, 2ed, Van Nostrand Reinhold, EUA, 1993
- [5] Mynbaev D. K., Scheiner L., *Fiber-Optic Communications Technology*, Prentice Hall, USA, 2001