

Capítulo 3

Dispositivos y circuitos ópticos

3.1 Canales clásicos de transmisión

Un sistema de telecomunicaciones es más efectivo en la medida en que su canal de transmisión permita la propagación a grandes distancias de señales de frecuencia elevada. Estos dos parámetros, frecuencia y distancia, no son siempre independientes.

3.1.1 Ondas Hertzianas

Las ondas electromagnéticas se pueden utilizar para transmitir información; a este tipo de transmisión se le llama radiodifusión. Cuando las ondas electromagnéticas se utilizan como canal de transmisión de la información, reciben el nombre de radioeléctricas o hertzianas. La información se introduce por medio de la modulación de la onda. Las ondas hertzianas se producen cuando una corriente con una amplitud suficiente circula en una antena que tiene dimensiones iguales a la longitud de onda de la onda que se transmitirá. Según sea la antena que se escoja, la energía en forma de ondas electromagnéticas puede emitirse en todas direcciones o en una dirección específica. La trayectoria y la distancia recorrida por las ondas hertzianas dependen de las condiciones atmosféricas y de la frecuencia de las ondas. En la tabla 3.1 se presenta la designación de las bandas de radiodifusión.

Gama de frecuencias	Gama de longitudes de onda en el vacío	Subdivisión métrica	Abreviatura métrica de las bandas de frecuencia	Símbolo (en inglés)
3 - 30 kHz	10 - 100 km	Ondas miriamétricas	B. Mam	VLF
30 - 300 kHz	1 - 10 km	Ondas kilométricas	B. Km	LF
300 - 3000 kHz	1 - 10 hm	Ondas hectométricas	B. hm	MF
3 - 30 MHz	1 - 10 dam	Ondas decamétricas	B. dam	HF
30 - 300 MHz	1 - 10 m	Ondas métricas	B. m	VHF
300 - 3000 MHz	1 - 10 dm	Ondas decimétricas	B. dm	UHF
3 - 30 GHz	1 - 10 cm	Ondas centimétricas	B. cm	SHF
30 - 300 GHz	1 - 10 mm	Ondas milimétricas	B. mm	SHF
300 - 3000 GHz	0.1 - 1 mm	Ondas decimilimétricas		

Tabla 3.1. Designación de las bandas de radiofrecuencia.

Las bandas de frecuencias hectométricas (B. hm) y decamétricas (B. dam) son las frecuencias que más se utilizan, Tienen la característica de ser reflejadas por la ionósfera, que es la capa de partículas cargadas (iones y electrones) situada en la atmósfera terrestre superior. Las partículas que componen la ionósfera se producen por radiaciones de alta energía procedentes del sol. Si una onda hectométrica o decamétrica encuentra esta capa, retornará rumbo a la Tierra donde podrá captarse con una antena receptora. Es así que, gracias a la reflexión, las ondas pueden recorrer distancias enormes. Sin embargo, como el sol perturba a la ionósfera, la reflexión no será estable a lo largo del tiempo. Para las ondas hectométricas, la reflexión es casi nula durante el día, lo que limita al alcance de la transmisión a algunas centenas de kilómetros. Durante la noche, la reflexión ionosférica es mucho mejor y facilita las transmisiones a través de miles de kilómetros. Sin embargo, las frecuencias utilizadas no ayudan a la transmisión de una gran cantidad de información.

Para las bandas de frecuencia métrica (B. m) y decimétrica (B. dm) ya no hay reflexión ionosférica. Las ondas se propagan en línea recta, y la transmisión solo puede hacerse si no hay un obstáculo sobre la trayectoria recta entre el emisor y el receptor. Es el caso de la televisión. La cantidad de información puede ser elevada, pero el alcance de la transmisión es limitado porque el emisor y el receptor deben estar en línea de vista.

En general, las microondas (ondas centimétricas y milimétricas) son las bandas de frecuencias superiores 1 GHz. La longitud de onda disminuye con el aumento de la frecuencia, lo cual tiene ventajas, aunque también inconvenientes. Las antenas pueden ser de menores dimensiones. Además, la emisión puede ser muy directiva, lo que permite concentrar energía en una dirección mejor definida, y de esta forma aumentar el alcance de la transmisión y evitar la interferencia con otros canales de transmisión. Si la frecuencia es muy elevada, la cantidad de información transmitida puede llegar a ser

muy grande. Sin embargo, si la longitud de onda λ fuera muy pequeña, la interacción con objetos que tienen dimensiones del orden de λ (difracción, difusión) sería muy grande. Por eso las gotas de lluvia tienen un efecto muy negativo en la propagación de las microondas. Además, con altas frecuencias, las moléculas de oxígeno y de agua contenidas en el aire absorben las ondas electromagnéticas, lo que limita el alcance de la transmisión a algunas decenas de kilómetros.

Estos inconvenientes se pueden remediar con la ayuda de guías de ondas. A las ondas se les obliga a propagarse dentro de un tubo metálico, en donde avanzan por reflexión en las paredes. Dicho tubo debe tener dimensiones del mismo orden que las de la longitud de onda. Si se controla la atmósfera dentro de la guía, puede lograrse que se disminuya la absorción por oxígeno, lo que permite aumentar el alcance de la transmisión. Sin embargo, esta absorción depende mucho de la calidad de la guía de ondas por lo que el costo de un sistema semejante es prohibitivo para las transmisiones a grandes distancias.

3.2 Comunicaciones ópticas

La necesidad de nuevos planteamientos en las comunicaciones surgió en países telefónicamente avanzados, en los que su red demandaba soluciones a problemas de saturación, y cuya única solución estaba en conseguir mayor capacidad que la existentes.

Hasta entonces, cuando se necesitaba un medio de transmisión de gran capacidad de tráfico se acudía a la instalación de cables coaxiales o de radioenlaces de mayor capacidad. Al aumentar el número de enlaces necesarios por demanda de tráfico, se precisaba un mayor ancho de banda del portador, lo que, a su vez, exigía el empleo de frecuencias cada vez más altas y, en consecuencia, más repetidores en las rutas de cables coaxiales, a causa de la mayor atenuación de las señales.

En el caso de los radioenlaces, el aumento de la capacidad también se traducía en el empleo de frecuencias más altas y mayor número de repetidores, pero esta vez con el agravante de la saturación del espectro electromagnético.

En resumen, la explotación de las redes telefónicas se iba haciendo más onerosa y aumentaban las dificultades en orden técnico, lo que exigía nuevos planteamientos para esos problemas. Las investigaciones realizadas en la década de los años sesenta en torno a la fibra óptica y sus posibles aplicaciones como guía de ondas sirvieron de base para el nuevo camino que se pretendía emprender.

3.2.1 La luz como soporte de información

Todos los cuerpos que no se hallan en equilibrio con su entorno radian o absorben energía. Se puede admitir desde un punto de vista conceptual que una comunicación implica un intercambio de energía; ahora bien, esa energía puesta en juego se puede clasificar de muchos modos, y uno de ellos es el espectral, en el que dos parámetros relacionados entre sí ordenan espacial y temporalmente dicha energía.

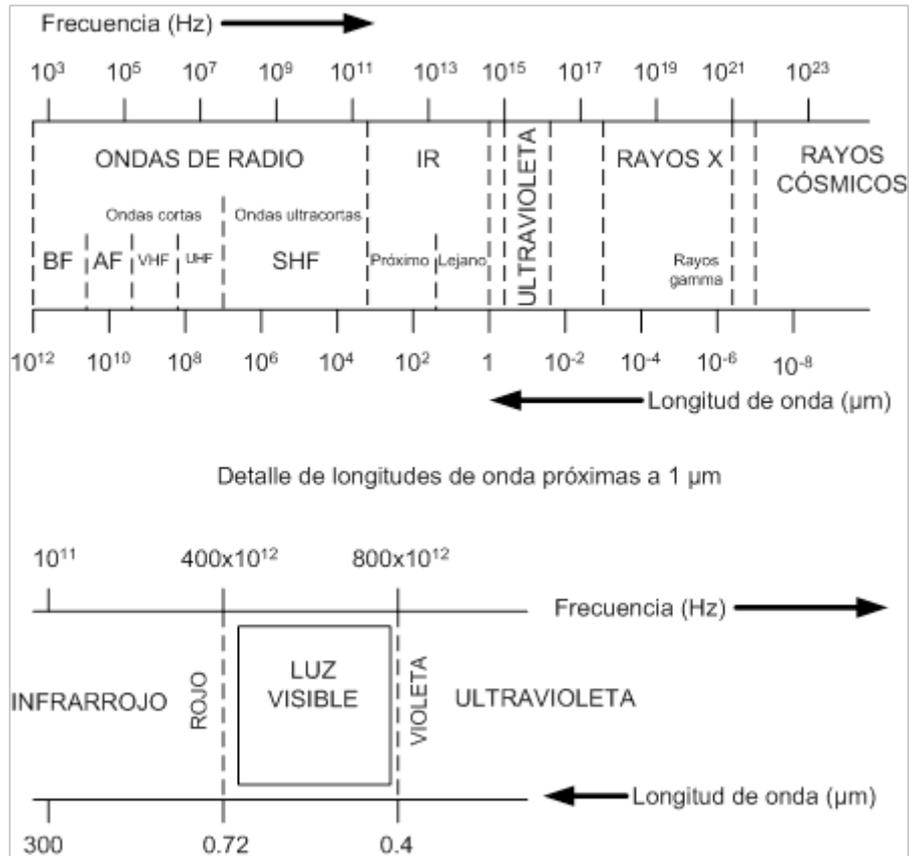


Figura 3.1 Espectro de frecuencias y longitudes de onda.

El parámetro espacial, la longitud de onda, indica que la propagación es espacialmente periódica; el segundo es temporal u se le denomina frecuencia. Una representación del espectro de frecuencias se presenta en la figura 3.1.

Hablando en términos de frecuencia, en el caso de la utilización de portadores metálicos, las energías transmitidas se situaban en zonas de frecuencia del orden de decenas de MHz (hasta 100MHz en teoría, y en la práctica no más de 60 MHz en el caso de cables coaxiales), y de decenas de GHz (hasta 10^{11} Hz en teoría y no más de 20 GHz) cuando se trataba de radioenlaces.

Estas señales, en técnicas de modulación de frecuencia (MDF), constituyen las portadoras que, empleadas sobre canales telefónicos de un ancho de banda típico de 4 kHz proporcionan un índice teórico de número de circuitos telefónicos que dichos portadores admiten.

Conceptualmente, un sistema de transmisión por fibra óptica es similar a un sistema de microondas en muchos aspectos; las diferencias estriban en que en un caso el medio de transmisión es el espacio libre, y en el otro, una guía de ondas de vidrio, y en que la transmisión tiene lugar a frecuencias ópticas, varios órdenes de magnitud superiores a las de las microondas. En la tecnología de las fibras ópticas se habla en términos de longitud de onda, en lugar de hacerlo en frecuencias, concentrándose ambas magnitudes ligadas por la relación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

donde λ es la longitud de onda del haz de luz en el medio considerado, c la velocidad de la luz en el mismo medio y f la frecuencia de la onda luminosa.

Si ahora se considera la zona espectral óptica, cuya frecuencia se sitúa en torno a los 10^{14} Hz, y suponiendo que se utilicen las técnicas MDF, la capacidad potencial de este medio de transmisión sería 10^7 veces la de un cable coaxial y 10^4 veces la de un radioenlace de microondas.

Esta probabilidad, por si sola, ya justifica el empleo del espectro óptico en las comunicaciones.

Es evidente que la utilización de la luz como portadora de información exige disponer de una fuente de determinadas características y, de hecho, fue la disponibilidad del láser como fuente de luz coherente y monocromática lo que estimuló a la exploración de comunicaciones ópticas como soporte de altos flujos de información, debido a la alta frecuencia de la portadora.

También en la década de los sesenta comenzaron los estudios básicos sobre los procesos de modulación y detección de luz, que eran necesarios para llevar a cabo las conversiones electrónicas imprescindibles en la transmisión de señales por medio de luz.

3.2.2 El medio de propagación

Una vez vista la posibilidad de utilizar estos generadores y detectores para transmisión de un haz de luz, quedaba por resolver el problema del medio de transmisión a emplear.

Los primeros experimentos sobre transmisión por la atmósfera a estas frecuencias pusieron de manifiesto diversos obstáculos: escasa fiabilidad de la transmisión debido a las precipitaciones atmosféricas, contaminación, turbulencia, etc. Así, los valores de atenuación de las señales en atmósfera húmeda oscilan entre 1 y 100 dB/km, dependiendo de la frecuencia de las señales y de la intensidad de la precipitación. Del mismo modo, los túneles de propagación causados por la estratificación atmosférica son particularmente sensibles a la frecuencia. Era evidente, por lo tanto, que en esas condiciones debía prescindirse de la atmósfera como medio de propagación.

La experiencia de años anteriores sobre transmisión a grandes distancias mediante guías de ondas (elípticas, circulares o rectangulares) no prosperaron, debido, entre otras razones, a la gran distorsión de fase que producían y que obligaba a la inserción periódica de igualadores del tiempo de propagación de grupo. La atenuación, sin embargo, se mantenía en límites razonables (unos 4 o 5 dB/km), al menos para frecuencias de unos pocos GHz, aumentando luego de modo casi exponencial. En definitiva, no aportaban un gran salto sobre la situación existente en los medios de transmisión en explotación hasta entonces. La aplicación de estas guías de ondas quedó

reducida a uniones rígidas entre los equipos transmisores o receptores y las antenas de los radioenlaces, con longitudes de ondas de algunas decenas de metros.

Las dificultades que presentaban los medios clásicos para conseguir un aumento de la cantidad de información a transmitir llevó a los científicos a pensar nuevamente en la luz como el portador de información de más alta capacidad del universo. Pero ocurrían tres problemas en la materialización de la idea:

- 1) Tendrían que desarrollarse dispositivos o procedimientos que transportaran la información sobre la luz como soporte.
- 2) Suponiendo que lo anterior se lograra, tendrían que desarrollarse dispositivos que, por un extremo, pudiesen inyectar luz en la guía de ondas cilíndrica, y por otro, fueran capaces de hacer en el extremo opuesto el efecto contrario, extrayendo de la luz la información original.
- 3) Tendrían que perfeccionarse las guías de ondas de vidrio, que para entonces presentaban una atenuación increíblemente grande (≈ 1000 dB/km) [1].

3.3 Efecto fotoeléctrico

El principio básico de la detección de luz empleando fotoemisión puede ser comprendido considerando el efecto fotoeléctrico, un fenómeno descubierto a finales del siglo XIX. Se encontró que se emitía carga negativa por una superficie metálica cuando se iluminaba con luz ultravioleta, y se descubrió que la energía cinética de dichos electrones emitidos dependían de la potencia óptica, así como de la frecuencia de la onda luminosa.

En 1905, Einstein propuso una explicación más elegante a este efecto, la cual ha tenido mayor profundidad e influencia en cuanto al entendimiento de la luz. Desde esta perspectiva, la luz consiste de paquetes discretos de energía llamados fotones, y en el proceso de absorción, toda la energía del fotón es entregada al electrón en el material. La energía de cada fotón es $h\nu$, donde h es la constante de Plank y ν es la frecuencia. La energía cinética del electrón afectado por la fotoemisión puede ser determinado basándonos en el diagrama de la figura 3.2. Dentro de un metal, los electrones tienen distribución de energía superior a un valor máximo, referido como nivel Fermi. El nivel Fermi es menor que la energía de los electrones en el aire que se encuentra fuera del material, la diferencia se conoce como la función de trabajo W . Para que un electrón escape del metal, se le debe aportar energía extra W , de manera que la energía que resultará en la fotoemisión es:

$$h\nu \geq W \quad (3.2)$$

Para energía del fotón mayores a la función de trabajo, el electrón será expulsado con energía cinética $E_c \leq h\nu - W$. Se presenta energía cinética menor al máximo porque

alguno de los electrones tiene una energía inicial menor al nivel de Fermi al absorber la energía del fotón.

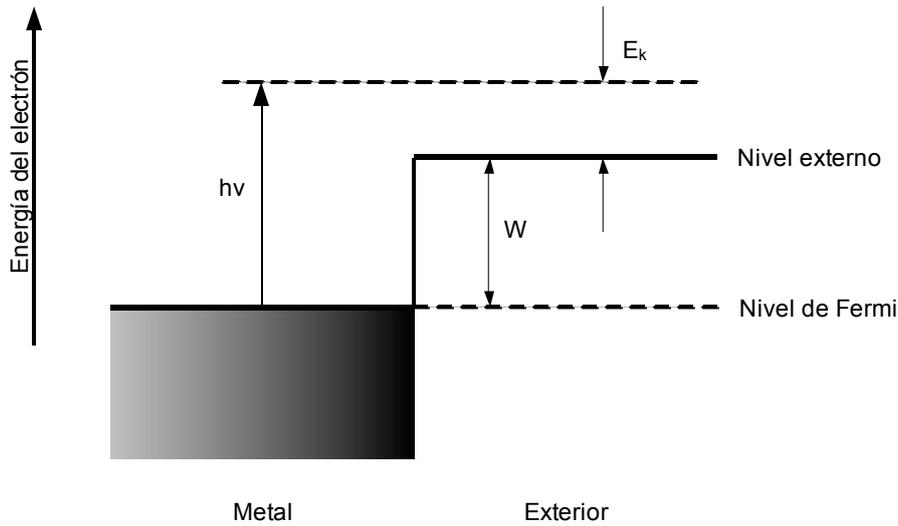


Figura 3.2 En el efecto fotoeléctrico, los fotones con energía mayor a la de la función de trabajo W son expulsados del metal con energía cinética máxima $h\nu = W$

Aunque la condición $h\nu > W$ asegura que la fotoemisión es energéticamente posible, no quiere decir que todos los electrones que absorben un fotón serán expulsados. A menos que el electrón se encuentre cerca de la superficie, éste debe viajar cierta distancia a través del metal para alcanzar la frontera del material. A través de dicho viaje, puede sufrir colisiones con otros electrones en el metal, lo cual hace que su energía cinética tienda a decrecer. En la práctica, la fracción de electrones que lo logran es realmente pequeña en un metal simple, del orden de 10^{-3} . Estos metales también tienen el inconveniente de manejar funciones de trabajo grandes ($W > 2$ eV), y no son aptos para detección de longitudes de onda del infrarrojo cercano.

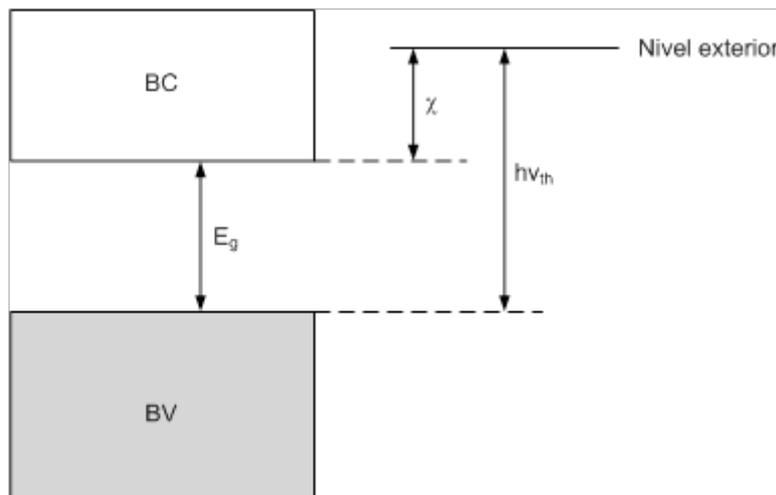


Figura 3.3 En un semiconductor, la fotoemisión toma lugar cuando la energía del fotón excede la suma de la anchura entre bandas y la afinidad del electrón χ .

Las aleaciones metálicas son empleadas más comúnmente para fotodetectores. Las aleaciones de interés son semiconductores, con una estructura de energía como la que se muestra en la figura 3.3. LA diferencia de energía entre el fondo de la banda de

conducción y el nivel de expulsión determinan la afinidad del electrón, denotada por χ . Ésta representa la energía requerida para expulsar a un electrón inicialmente en la banda de conducción. Ya que inicialmente la mayoría de los electrones se encuentran en la banda de valencia, la energía del fotón que resultará en la fotoemisión es:

$$h\nu \geq E_g + \chi \quad (3.3)$$

donde E_g es la energía en la apertura de banda.

La eficiencia de escape es mucho mayor para semiconductores que para metales simples porque en los primeros hay muy pocos electrones libres en la banda de conducción como para causar colisiones con los electrones expulsados. Existirán colisiones con vibraciones; por lo cual, la eficiencia es menor a la unidad. a temperatura ambiente se obtienen eficiencias en el rango de 10 – 20 %.

Las aleaciones metálicas tienen la ventaja de que la energía de activación $E_g + \chi$ es mucho menor que la que posee cualquier metal simple. Las aleaciones metálicas empleadas en fotodetectores comúnmente poseen átomos del grupo 1 de la tabla periódica, ya que sus electrones de capas superiores presentan menores energías, brindando una menor energía en la apertura de banda para el semiconductor.

Es posible reducir la χ efectiva, incluso hacerla negativa depositando una película delgada de Cs en la superficie de un semiconductor altamente dopado con partículas p, como el GaAs. los átomos de Cs donan fácilmente sus electrones más lejanos a los iones de GaAs, creando un espacio de carga, que constituye una región cerca de la superficie [2].

3.4 Fotorresistencia

El LDR (Light - Dependent Resistor) es una resistencia que varía su valor dependiendo de la cantidad de luz que la ilumina. Es un componente optoelectrónico que tiene la característica de disminuir su resistencia con el aumento de intensidad de luz incidente. Los valores de una fotorresistencia cuando está totalmente iluminada y cuando está totalmente a oscuras varía, puede medir de 50 Ω a 1000 Ω (1k Ω) en iluminación total y puede ser de 50 k Ω (50,000 Ω) a varios M Ω cuando está a oscuras.

El valor de la fotorresistencia (en Ω) no varía de forma instantánea cuando se pasa de luz a oscuridad o al contrario, y el tiempo que se dura en este proceso no siempre es igual si se pasa de oscuro a iluminado o si se pasa de iluminado a oscuro.

Esto hace que el LDR no se pueda utilizar en muchas aplicaciones, especialmente aquellas que necesitan de mucha exactitud en cuanto a tiempo para cambiar de estado (oscuridad a iluminación o iluminación a oscuridad) y a exactitud de los valores de la fotorresistencia al estar en los mismos estados anteriores. Su tiempo de respuesta típico es de aproximadamente 0.1 segundos.

El LDR o forresistencia es un elemento muy útil para aplicaciones en circuitos donde se necesita detectar la ausencia de luz de día.

Los fotorresistores están hechos de un semiconductor de alta resistencia. Si la luz que incide en el dispositivo es de alta frecuencia, los fotones son absorbidos por la elasticidad del semiconductor dando a los electrones la suficiente energía para saltar la banda de conducción. El electrón libre que resulta (y su hueco asociado) conduce electricidad, dando como resultado la disminución de la resistencia. El LDR es fabricado con materiales de estructura cristalina, y utiliza sus propiedades fotoconductoras. Los cristales utilizados más comunes son: sulfuro de cadmio y seleniuro de cadmio.

El sulfuro de cadmio o las células de sulfuro del cadmio (CdS) se basan en la capacidad del cadmio de variar su resistencia según la cantidad de luz que pulsa la célula. Cuanto más luz pulsa, más baja es la resistencia. Aunque no es exacta, incluso una célula simple de CdS puede tener una amplia gama de resistencia de cerca de 600Ω en luz brillante a 1 o $2 \text{ M}\Omega$ en oscuridad.

Las células son también capaces de reaccionar a una amplia gama de frecuencias, incluyendo infrarrojo (IR), luz visible, y ultravioleta (UV).

Un dispositivo fotoeléctrico puede ser intrínseco o extrínseco. En dispositivos intrínsecos, los únicos electrones disponibles están en la banda de la valencia, por lo tanto el fotón debe tener bastante energía para excitar el electrón a través de toda la banda prohibida. Los dispositivos extrínsecos tienen impurezas agregadas, que tienen energía de estado a tierra más cercano a la banda de conducción puesto que los electrones no tienen que saltar lejos, los fotones más bajos de energía (es decir, de mayor longitud de onda y frecuencia más baja) son suficientes para accionar el dispositivo.

Se fabrican de diversos tipos. Se pueden encontrar células baratas de sulfuro del cadmio en muchos artículos de consumo, por ejemplo cámara fotográfica, medidores de luz, relojes con radio, alarmas de seguridad y sistemas de encendido y apagado del alumbrado de calles en función de la luz ambiente. En el otro extremo de la escala, los fotoconductores de Ge:Cu son los sensores que funcionan dentro de la gama más baja "radiación infrarroja".

3.5 Fototransistor

El reciente interés en los fototransistores se debe a la buena calidad del material de los dispositivos de heterojuntura y la alta ganancia que es posible alcanzar en los transistores bipolares de heterojuntura. Empleando la heterojuntura, se logra una apertura entre bandas ancha configurada en el emisor, es así como se configura un fototransistor de heterojuntura (HPT), en el cual se mejora la eficiencia del emisor. La heterojuntura destaca la restricción en las concentraciones relativas de materiales

dopantes en ambos lados de la juntura base – emisor, y es posible obtener una alta ganancia ancho de banda. Los HPTs han sido considerados como fotodetectores muy útiles cuya alta ganancia intrínseca es apta para sistemas de comunicaciones por fibra óptica. A partir de la década de 1980, parámetros como el ancho de banda, ganancia y ruido de los HPTs han sido estudiados con materiales basados en GaAs/AlGaAs. A diferencia de los fotodiodos de avalancha (APDs), los HPTs pueden proveer una gran ganancia sin la necesidad de tener un voltaje orientado y ruido de avalancha excesivo en el proceso de amplificación.

Para el fototransistor *npn* mostrado en la figura 3.4, la base no tiene orientación alguna, y el voltaje es aplicado entre el emisor y el colector, ya que las junturas del emisor y el colector están orientadas en reversa, respectivamente. El ancho de apertura de banda del emisor es transparente para fotones incidentes, la mayoría de los cuales son absorbidos en las regiones de base y colector. Los huecos fotogenerados acumulados en la base cambian el potencial en la juntura emisor – base y causa una inyección de electrones desde el emisor a la base. La ganancia de corriente se obtiene cuando el tiempo que el electrón pasa en la base es mayor al tiempo de tránsito. La ausencia de contacto de base es primordial para reducir la capacitancia. La respuesta en frecuencia del fototransistor puede ser mejorada empleando diseños con baja capacitancia de emisor (emisor ligeramente dopado) y resistencia de base reducida (base altamente dopada). Esto puede comprometer la eficiencia de inyección en el caso de los transistores *npn* de homoestructura. Sin embargo, empleando un material cuya apertura de bandas sea más ancha en el emisor, la discontinuidad de la banda de valencia puede mejorar en gran medida la eficiencia de inyección en el emisor.

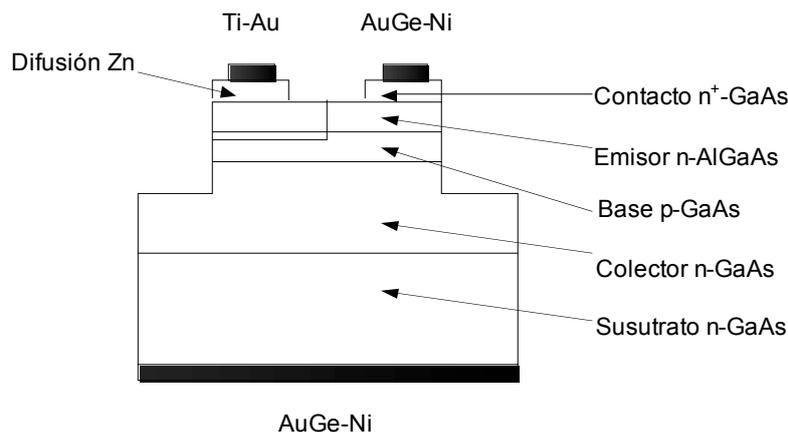


Figura 3.4 Diagrama esquemático de un fototransistor *npn* de GaAs/AlGaAs con región de la base con conexión difusa.

La mayoría de los HPTs son de tipo superficie normal. Como las dimensiones del dispositivo son reducidas para lograr una operación de alta velocidad, el acoplamiento óptico para los dispositivos se vuelve desafiante. Se han presentado guías de onda HPT para lograr un buen acoplamiento óptico con dimensiones de dispositivo pequeñas.

Una aplicación particular en microondas fotónicas de los HPT es un mezclador optoelectrónico. El HPT tiene una ganancia de transistor no lineal, la cual es función de la potencia óptica incidente, o del dispositivo de corriente. Empleando esta propiedad, el HPT puede mezclar una señal óptica con otra señal óptica, o bien, mezclar una señal

óptica con una señal eléctrica para generar un conversor de frecuencias de RF a microondas, o viceversa [3].

3.6 Celda fotovoltaica

Los fotodetectores trabajan, en general, expulsando electrones desde un material denominado fotocátodo. Esto es posible para un electrón que en la banda de valencia (BV) es promovido a la banda de conducción (BC) sin ser expulsado del material. Este proceso se ilustra en la figura 3.5, y puede ser idealizado como un efecto fotoeléctrico interno. Una vez que el electrón está en la BC, éste se vuelve móvil y contribuye a la conductividad eléctrica. Éste incremento en la conductividad del material bajo absorción de luz es denominada fotoconductividad, y es el principio de operación de las fotoceldas (celdas fotovoltaicas).

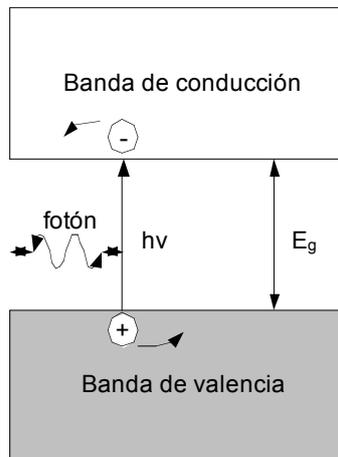


Figura 3.5 En el efecto fotoeléctrico interno, los pares electrón – hueco se crean por la absorción de un fotón en el semiconductor.

Es claro en la figura 3.5 que para que un fotón sea absorbido, su energía $h\nu$ debe ser mayor que la apertura entre bandas con una probabilidad α por unidad de longitud, donde α es el coeficiente de atenuación. Después de que la luz se ha propagado una distancia x en el material, su intensidad se reduce de acuerdo con la ley de Beer, $I(x)=I(0)\exp(-\alpha x)$, donde $I(0)$ es la intensidad solo dentro de la superficie Si la distancia total entre las paredes del material en la dirección de la propagación de la luz es d , entonces una fracción

$$\eta_{abs} = \frac{P_{abs}}{P_{in}} = (1 - R)(1 - e^{-\alpha d}) \quad (3.4)$$

de la luz incidente es absorbida. Esta expresión toma en cuenta la fracción R del rayo de luz incidente que es reflejado desde la superficie.

El comportamiento de una fotocelda puede ser comprendido considerando un modelo simple como el de la figura 3.6. Un semiconductor uniforme de longitud L desde el lado

con luz, y los fotones que son absorbidos crean pares electrón – hueco dentro del semiconductor. Un voltaje V_0 se aplica entre las terminales como se muestra, dando paso a un campo eléctrico $E = V_0/L$ en el material. Bajo la influencia del campo E , los electrones y huecos se mueven en direcciones opuestas, generando la señal i_s en el circuito externo. Esta corriente induce una caída de voltaje $i_s R_L$ en la resistencia de carga R_L , la cual constituye la señal del detector.

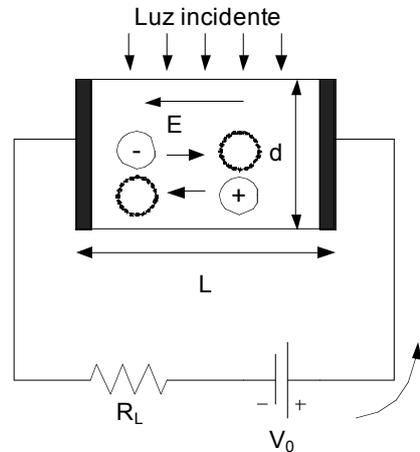


Figura 3.6 En una fotocelda, los portadores de carga creados por los fotones absorbidos se mueven bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado.

Una característica de la fotocelda es la presencia de una corriente de respaldo i_0 , aun cuando no hay una luz incidente. Esto ocurre porque el semiconductor tiene, intrínsecamente, una conductividad eléctrica pequeña y finita, debida a la generación térmica de pares electrón - hueco. Si la resistencia eléctrica del semiconductor es R_d , la corriente de respaldo es:

$$i_0 = \frac{V_0}{R_L + R_d} \quad (3.5)$$

La corriente total es entonces $i = i_0 + i_s$. En la práctica, la corriente de soporte i_0 comúnmente domina a la corriente i_s requiriendo técnicas especiales para extraer la señal pequeña de la gran constante de soporte.

Para evaluar la corriente de la señal inducida es necesario tomar en cuenta que la corriente de la señal es producida mientras los portadores de carga se mueven en presencia de un campo eléctrico. Es notable que la velocidad del electrón $v_e(t)$ no es lineal a través del tiempo. Las colisiones (con otros electrones, fotones e impurezas) hacen más aleatorio el movimiento, por lo tanto, el movimiento mantiene un promedio constante, dado por:

$$v_e = \mu_e E \quad (3.6)$$

donde μ_e es la movilidad del electrón. Se puede escribir una ecuación similar para la movilidad de los huecos, $v_h = \mu_h E$, y ambos, electrones y huecos contribuyen a la corriente de la señal i_s . Sin embargo, se ha encontrado en muchos materiales que $\mu_h \ll \mu_e$, así que el efecto del movimiento de los huecos usualmente es de menor importancia. Así mismo, comúnmente, los huecos se guardan en sitios impuros, en

dónde se vuelven inmóviles y detienen su contribución a la fotocorriente. Para ésta se tiene:

$$i_s(t) = \frac{e\mu_e E}{L} \quad (3.7)$$

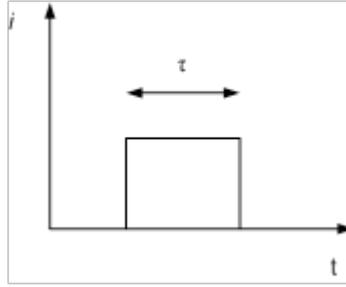


Figura 3.7 Respuesta de corriente para un par electrón hueco creado en el semiconductor de la fotocelda.

Esta corriente se mantiene mientras el electrón se encuentra en la banda de conducción, lo cual está limitado por su tiempo en ella, τ . Entonces, el pulso de corriente es dependiente del tiempo, como se muestra en la figura 3.7. La carga total en el pulso de corriente se obtiene integrando el pulso a través del tiempo.

$$Q = \int i_s(t) dt = \frac{e\mu_e E \tau}{L} = \frac{e\mu_e V_0 \tau}{L^2} \quad (3.8)$$

Es convencional definir la ganancia fotoconductiva G de un detector como:

$$G \equiv \frac{Q}{e} = \frac{\mu_e V_0 \tau}{L^2} \quad (3.9)$$

Este resultado muestra que la carga detectada se incrementa en tanto el voltaje V_0 se incrementa. Considerando el tiempo de tránsito del electrón, t_{tr} , definido como el tiempo que a éste le toma viajar a través de la longitud L del semiconductor:

$$t_{tr} = \frac{L}{v_e} = \frac{L}{\mu_e E} = \frac{L^2}{\mu_e V_0} \quad (3.10)$$

Con este resultado, se puede obtener una expresión simple para la ganancia fotoconductiva:

$$G = \frac{\tau}{t_{tr}} \quad (3.11)$$

La ganancia fotoconductiva es mayor a la unidad cuando el electrón permanece en la BC más que el tiempo que le toma atravesar el semiconductor. Esto se puede suponer cuando el electrón alcanza el límite del semiconductor, el pulso de corriente debe terminar, a partir de ahí, no hay más movimiento de cargas en el campo eléctrico. La τ efectiva está limitada por el tiempo de tránsito t_{tr} , y la ganancia limitada a la unidad.

Si el contacto entre los electrodos y el semiconductor es ohmico (esto es, que obedece la Ley de Ohm), entonces no hay límite para la inyección de nuevos electrones dentro del

semiconductor. En este caso, los electrones que abandonan el semiconductor son reemplazados por nuevos, como se describe en la figura 3.8. Los electrones que son fotoexcitados desde la BV a la BC pueden ser remitidos en la BC efectivamente por tiempo mayor que el tiempo de tránsito. Este proceso de reemplazamiento continuará hasta que la recombinación electrón – hueco ocurra, o hasta que el hueco que fue inicialmente creado realice un recorrido completo a través del semiconductor.

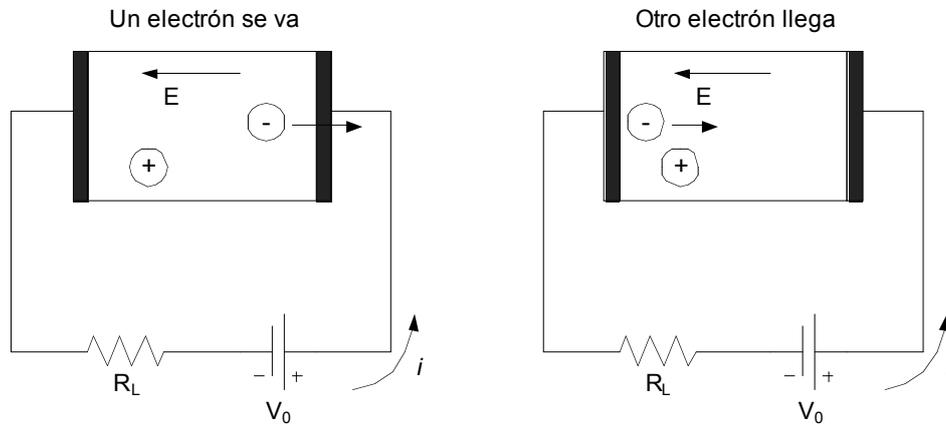


Figura 3.8 LA ganancia es posible en una fotocelda porque los electrones que abandonan al semiconductor en un lado son reemplazados por otros electrones que entran al otro lado.

La ganancia fotoconduktiva es lineal para un voltaje aplicado V_0 , de acuerdo con la ecuación (3.9). Mayor voltaje, por ende, provee mayor ganancia y una mayor señal. La figura 3.9 muestra como ésta relación pudiera ser modificada si el electrón no fuera reemplazado en los electrodos. En dicho caso, la ganancia se saturaría en la unidad, cuando el voltaje aplicado alcanza $V_{sat} = L^2/(\mu\tau)$. Incrementando el voltaje más allá de V_{sat} se puede mejorar el tiempo de respuesta del detector, pero sin incrementar la señal.

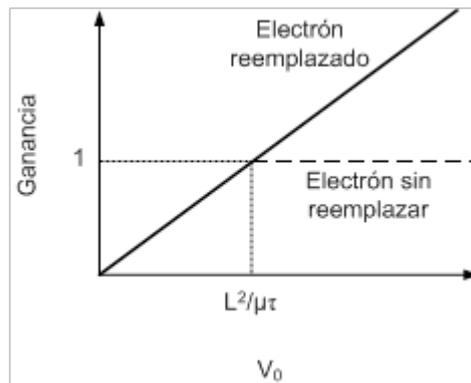


Figura 3.9 La ganancia fotoconduktiva se incrementa linealmente con un voltaje aplicado, y puede exceder la unidad si los electrones son reemplazados después de alcanzar el electrodo.

Algunos materiales fotoconduktivos comunes, con sus rangos de sensibilidad espectral son CdS (400 – 700 nm), CdSe (500 – 900 nm), PbS (1 – 32 μm), y PbSe (1.5 – 5.2 μm). Son altamente sensitivos, pueden operar a temperatura ambiente [2].

3.7 Diseño e implementación de circuitos básicos con dispositivos ópticos

3.7.1 Circuito medidor de luz basado en fotorresistencias y celdas

Objetivos:

1. Familiarizarse con el comportamiento de dispositivos ópticos tales como fotorresistencias y celdas fotovoltaicas.
2. Realizar circuitos que permitan cuantificar la cantidad de luz incidente en los dispositivos ópticos a observar (fotorresistencias y celdas fotovoltaicas).

Preludio:

Las fotorresistencias son detectores de luz semiconductores que no tienen una unión p-n. Su resistencia es muy alta (millones de ohms) cuando no hay luz. Al iluminarse, su resistencia es muy baja (cientos de ohms).

Algunos aspectos importantes sobre la operación de un transistor se mencionan a continuación:

1. Las fotorresistencias pueden requerir de unos cuantos milisegundos o más para responder completamente a los cambios de intensidad de la luz, ya que son bastante lentos. Requieren de varios minutos para regresar a su resistencia oscura normal una vez que se ha retirado de la luz (efecto de memoria).
2. El semiconductor que con mayor frecuencia se utiliza en las fotorresistencias es el sulfuro de cadmio. su sensibilidad a la luz es muy similar a la del ojo humano. El sulfuro de plomo se utiliza para detectar rayos infrarrojos de hasta 3 micrómetros.

Existen muchos tipos diferentes de fotorresistencias. En la mayor parte, el semiconductor sensible a la luz está cubierto entre dos capas de electrodos para aumentar la superficie expuesta. Se puede o no utilizar ventana de vidrio o plástico.

Las fotorresistencias se utilizan en relevadores controlados por luz y en medidores de luz.

En la figura 3.10 se muestra un medidor de corriente generada por la intensidad de la luz que ilumina a una fotorresistencia.

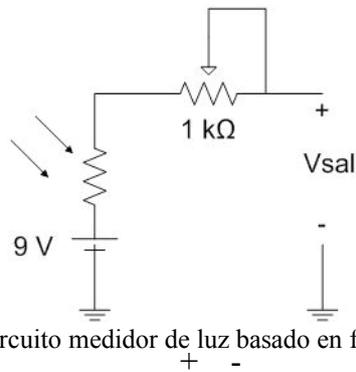


Figura 3.10. Circuito medidor de luz basado en fotorresistencias.

Las celdas solares son fotodiodos de unión p-n que tienen una gran área excepcionalmente sensible a la luz. Una sola celda solar puede generar 0.5 V a la luz solar brillante. Se elaboran muchos tipos de celdas solares de silicio.

Con frecuencia, las celdas individuales se conectan en serie o en paralelo. Los arreglos de celdas solares pueden cargar celdas recargables y baterías. Así mismo, es posible emplear las celdas solares como medidores de luz, sin necesidad de emplear fuentes de voltaje extra, tal como se muestra en la figura 3.11.

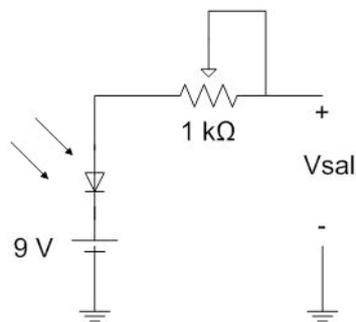


Figura 3.11. Circuito medidor de luz basado en celdas solares.

Material:

- 1 Fotorresistencia
- 1 celda
- 1 Potenciómetro de 1 kΩ
- 1 lámpara
- 1 interfaz opaca (papel albanene, papel china, acrílico, etc.)
- Osciloscopio NI-SCOPE

Procedimiento

Actividad 1. Caracterización de la fotorresistencia.

1. Armar el circuito de la figura 3.12.

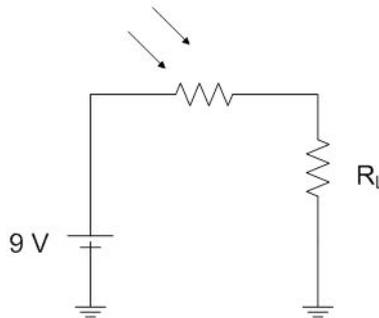


Figura 3.12. Caracterización de la fotorresistencia.

2. Elegir el valor de la resistencia de carga (R_L).
3. Observar el valor de voltaje en la resistencia de carga cuando la fotorresistencia no recibe luz. Anotar los resultados.
4. Repetir el paso anterior, pero ahora iluminando la fotorresistencia. Anotar los resultados.
5. Con los valores observados en los pasos anteriores, obtenga sus correspondientes valores de corriente (mediciones indirectas), y con ellos, calcule el rango de valores que puede tomar la fotorresistencia.
6. Anote los resultados obtenidos en la tabla 3.2.
7. Realizar conclusiones sobre los datos asentados en la tabla 3.2.

Situación	V_L [V]	i_L [mA]	R_L [Ω]	R [Ω]
Sin Luz				
Con Luz				

Tabla 3.2. Obtención del valor de la fotorresistencia con luz y sin luz.

Actividad 2. Mediciones con los dispositivos ópticos.

8. Armar el circuito de la figura 3.10.
9. Alumbrar la fotorresistencia.
10. Manipular el potenciómetro a manera de proporcionar diferentes valores de resistencia.
11. Obtener valores de voltaje con la ayuda del osciloscopio, para completar la tabla 3.3.
12. Armar el circuito de la figura 3.11.
13. Alumbrar la celda solar.
14. Manipular el potenciómetro a manera de proporcionar diferentes valores de resistencia.
15. Obtener valores de voltaje con la ayuda de un osciloscopio, para completar la tabla 3.3.

R_{POT} [Ω]	V_{FR} [V]	V_{CEL} [V]
0		
250		
500		
750		
1000		

Tabla 3.3. Voltaje proporcionado por los dispositivos ópticos

16. Realizar conclusiones respecto a los resultados mostrados en la tabla 3.3.

Actividad 3. Variaciones en la luz incidente.

17. Para cada uno de los circuitos implementados anteriormente, colocar el potenciómetro a una resistencia aproximada de 500 Ω y variar la iluminación que se le proporciona al dispositivo óptico, por medio de una interfaz opaca.

18. Anotar los resultados en la tabla 3.4.

Luz incidente	V _{FR} [V]	V _{CEL} [V]
Con interfaz		
Sin interfaz		

Tabla 3.4. Cantidad de luz obtenida en los dispositivos ópticos variando las condiciones de luz.

19. Realizar conclusiones respecto a los resultados mostrados en la tabla 3.4.

Desarrollo

Actividad 1. Caracterización de la fotorresistencia.

Se elige como valor de la resistencia de carga $R_L = 18 \Omega$. En paralelo a dicho componente se conecta un canal del osciloscopio NI-SCOPE para observar el voltaje en la carga (V_L).

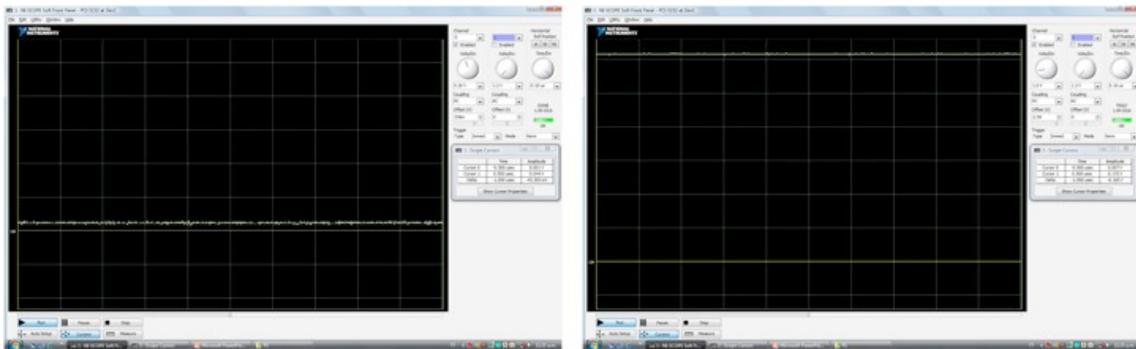


Figura 3.13. Caracterización de la resistencia. a) VL sin luz. b) VL con luz.

Para el caso en el que no se ilumina la fotorresistencia, se obtiene un voltaje en la carga $V_L = 0.044 \text{ V}$. Haciendo uso de la ley de Ohm, que se cita a continuación:

$$V = Ri$$

es posible obtener el valor de la corriente proporcionada a la carga, proveniente de la fotorresistencia, de la siguiente manera:

$$i = \frac{V_L}{R_L},$$

de lo cual se obtiene que $i = 2.44$ mA. Dicha corriente circula a través del circuito, por lo cual, su valor es útil para obtener la resistencia máxima proporcionada por la fotorresistencia. Para tal fin, es imprescindible hacer uso nuevamente de la Ley de Ohm de la siguiente manera:

$$R_{FR} = \frac{V_{in}}{i},$$

tomando en cuenta que el voltaje de alimentación (V_{in}) es de 9 V. Se procede con el cálculo.

Para dichas condiciones se tiene que el valor de la fotorresistencia es de 3.68 k Ω .

En el caso en el que se iluminó la fotorresistencia se obtuvo un voltaje en la carga de 6.72 V. Bajo esta situación, se procede de la misma manera para obtener la corriente del circuito y el valor en la fotorresistencia, los cuales son 342.88 mA y 26.248 Ω , respectivamente.

Situación	V _L [V]	i _L [mA]	R _L [Ω]	R [Ω]
Sin Luz	0.044	2.44	18	3.68 k
Con Luz	6.172	342.88	18	26.248

Tabla 3.15. Valor de la fotorresistencia con luz y sin luz.

Como era de esperarse, para la fotorresistencia, se observa que cuando no existe luz incidente, ésta presenta una resistencia grande en comparación a la que presenta cuando es iluminada.

Actividad 2. Mediciones con los dispositivos ópticos.

Como parte de esta actividad, se iluminaron los dispositivos ópticos con la lámpara de manera constante, y se hizo variar el valor de resistencia provista por el potenciómetro, obteniéndose así los siguientes resultados:

R _{POT} [Ω]	V _{FR} [V]	V _{CEL} [V]
0	6.207	0.986
250	4.771	0.816
500	2.833	0.469
750	1.238	0.221
1000	0	0.006

Tabla 3.16. Voltaje proporcionado por los dispositivos ópticos

En el osciloscopio NI-SCOPE se observó lo siguiente:

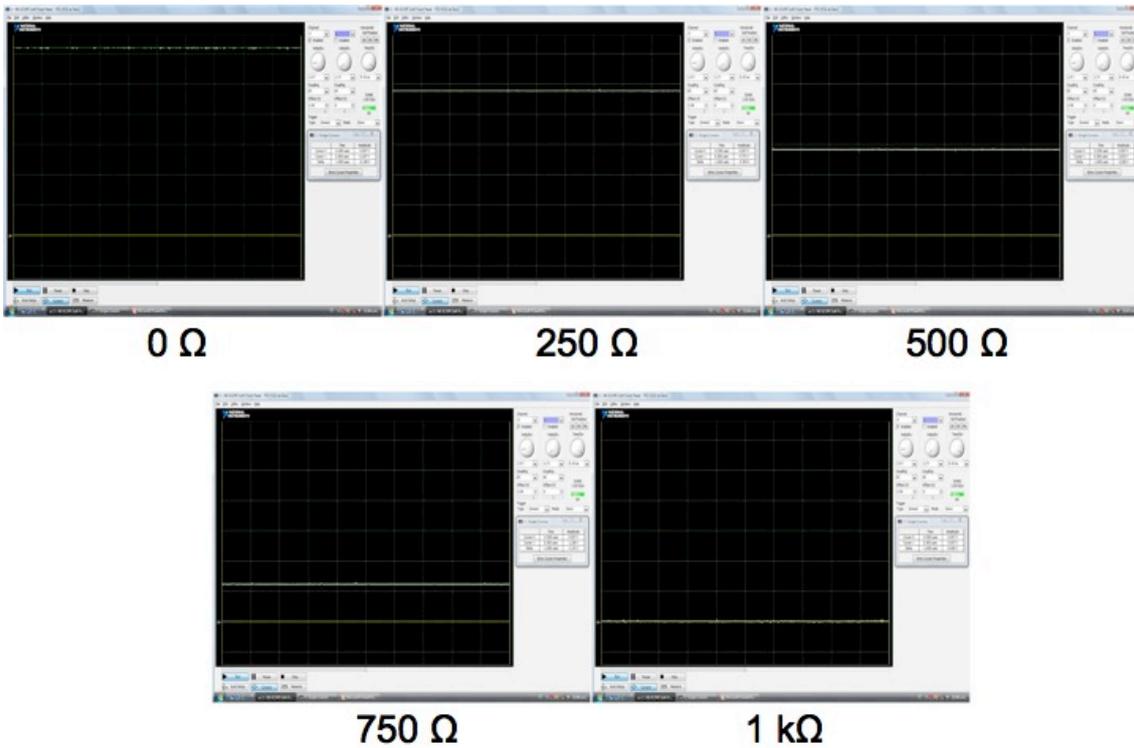


Figura 3.14. Secuencia de valores obtenidos al variar la resistencia del potenciómetro en el circuito con fotorresistencia.

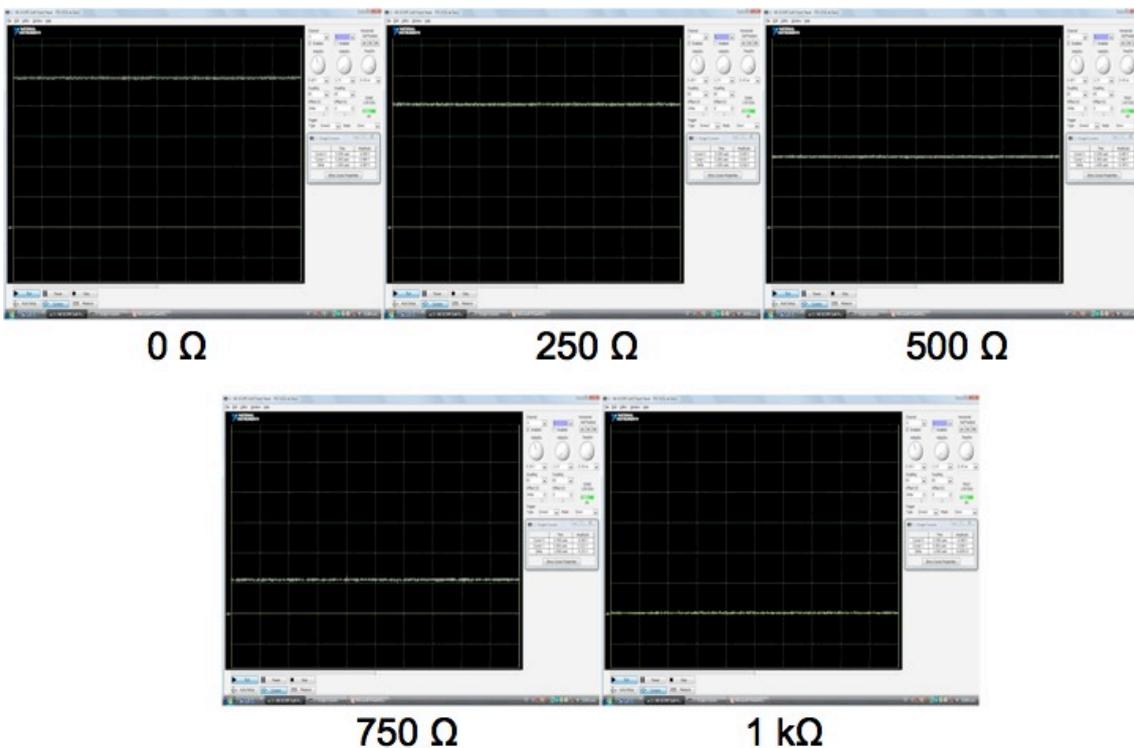


Figura 3.15. Secuencia de valores obtenidos al variar la resistencia del potenciómetro en el circuito con la celda fotovoltaica.

En los resultados anteriores se puede observar claramente que en un inicio, el voltaje que proporciona la celda solar es muy pequeño, y cabe mencionarse que ante las condiciones de laboratorio, en donde no existe iluminación natural (solar), la celda fotovoltaica no llega a su máximo desempeño. Por otra parte, es posible observar el

comportamiento del circuito que al aumentar la resistencia en el potenciómetro, disminuye notablemente el voltaje medido; sin embargo, es notable que la fotorresistencia es más sensible a dichos cambios.

Actividad 3. Variaciones en la luz incidente.

Para efectos de este experimento, se empleó papel albanene como interfaz opaca, y se fijó el potenciómetro a 500Ω en ambos circuitos, con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Luz incidente	V_{FR} [V]	V_{CEL} [V]
Con interfaz	1.652	0.421
Sin interfaz	3.061	0.501

Tabla 3.17. Cantidad de luz obtenida en los dispositivos ópticos variando las condiciones de luz.

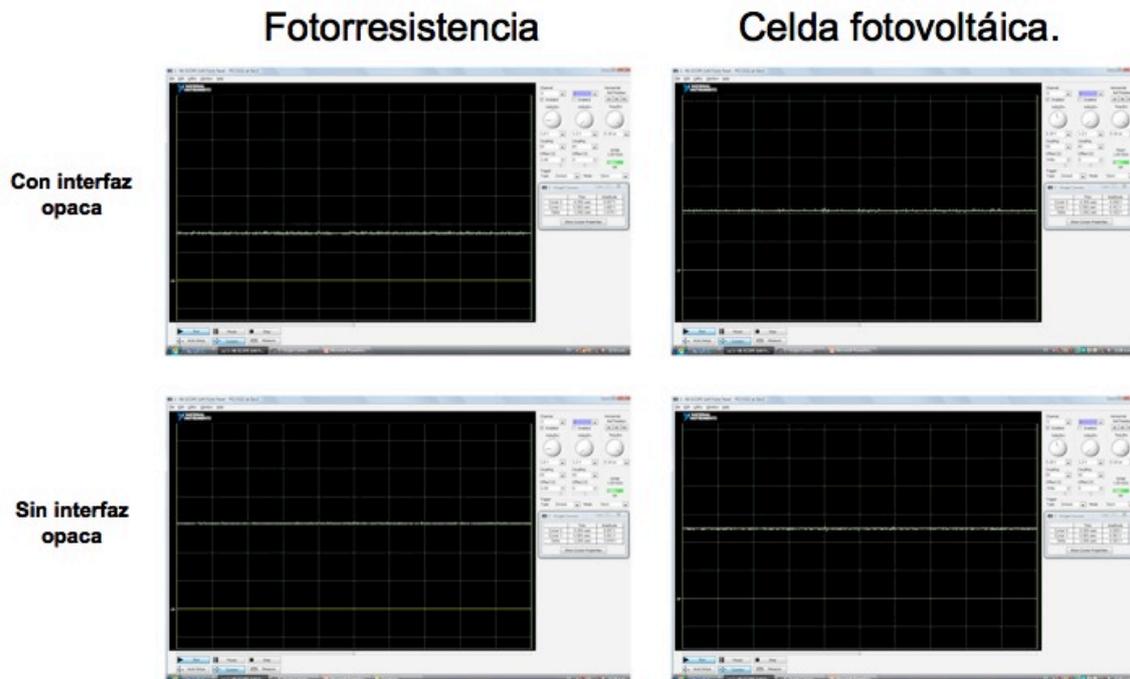


Figura 3.16. Voltajes obtenidos ante las variaciones de luz en los dispositivos ópticos.

Lo que se puede observar de ambos dispositivos bajo tales condiciones es la sensibilidad que éstos presentan ante diferentes intensidades de luz, de lo cual podemos decir que la fotorresistencia es comparativamente más sensible a dichos cambios luminosos.

3.7.2 Circuito de relevador activado por luz basados en fotorresistor y fototransistor.

Objetivos:

1. Familiarizar al experimentador con la optoelectrónica a través de la interacción de dispositivos ópticos, como el fotorresistor y el fototransistor, con dispositivos electromecánicos, tales como relevadores.
2. Comprender la interacción entre los dispositivos ópticos y los electromecánicos en el circuito de relevador activado por luz.

Preludio:

El relevador es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Fue inventado por Joseph Henry en 1835. Ya que el relevador es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, una forma de amplificador eléctrico. Como tal se emplearon en telegrafía, haciendo la función de repetidores que generaban una nueva señal con corriente procedente de pilas locales a partir de la señal débil recibida por la línea. Se les llamaba "relevadores".

El contacto del relevador (bobina de 6-9 V, 500 Ω) se pone en marcha con luz o cualquier otro dispositivo similar.

En la figura 3.17 se muestra un circuito de relevador activado por luz basado en fotorresistor, para el cual, el potenciómetro controla la sensibilidad. El relevador permanece activo mientras haya luz y en ausencia de ésta, permanece activado un tiempo breve.

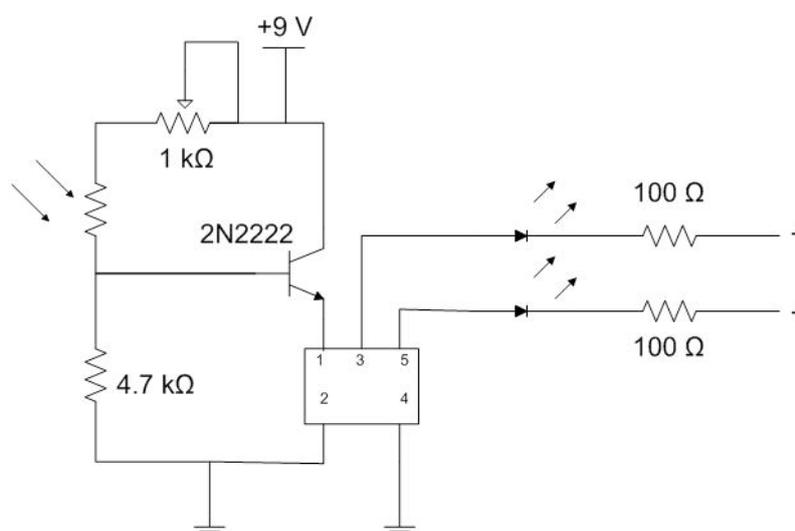


Figura 3.17. Circuito de relevador activado por luz, basado en fotorresistor.

Así mismo, se puede emplear la misma configuración , pero basado en un fototransistor, como se muestra en la figura 3.18. En donde la respuesta es más rápida y no hay retraso cuando se quita la luz.

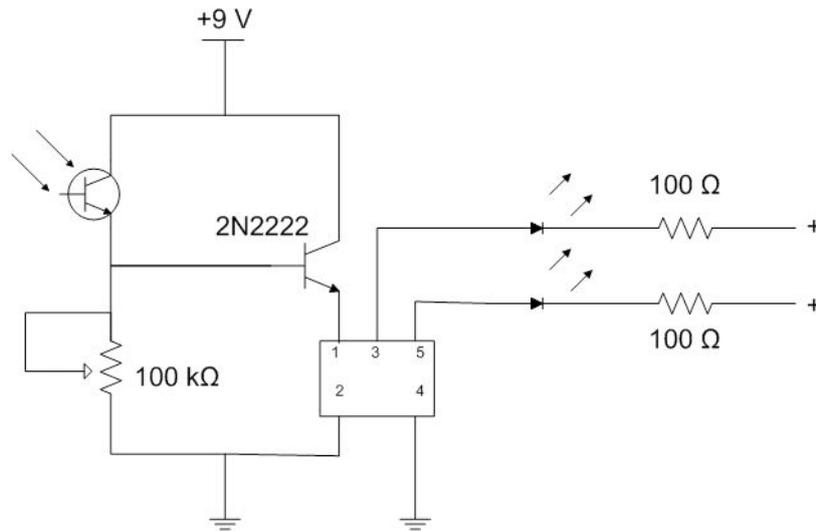


Figura 3.18. Circuito de relevador activado por luz, basado en fototransistor.

Material:

- 1 potenciómetro de 1 kΩ
- 1 potenciómetro de 100 kΩ
- 1 relevador de 500 Ω, 6 V.
- 1 transistor 2N2222
- 1 resistencia de 4.7 kΩ
- 1 fototransistor
- 1 fotorresistor
- 1 lámpara
- Osciloscopio NI-SCOPE

Procedimiento

Actividad 1. Circuito relevador activado por luz, basado en fotorresistencia.

1. Armar el circuito de la figura 3.17.
2. Observar que sin iluminar la fotorresistencia, un led debe estar encendido.
3. Iluminar el fotorresistor con la lámpara.
4. ¿Qué sucede cuándo se ilumina la fotorresistencia?
5. Manipular el potenciómetro para controlar la sensibilidad del fotorresistor.
6. Anotar las observaciones señaladas en la tabla 3.18.

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]
Sin luz		
Con luz		

Tabla 3.18. Observaciones en el circuito de relevador basado en fotorresistor.

7. Graficar ambas señales.

8. Realizar conclusiones respecto a lo observado en el relevador.

Actividad 2. Circuito relevador activado por luz, basado en transistor.

9. Armar el circuito de la figura 3.18.
10. Observar que sin iluminar el fototransistor, un led debe estar encendido.
11. Iluminar el fototransistor con la lámpara.
12. ¿Qué sucede cuando se ilumina el fototransistor con la lámpara?
13. Manipular el potenciómetro para controlar la sensibilidad del fototransistor.
14. Anotar las observaciones señaladas en la tabla 3.19.

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]
Sin luz		
Con luz		

Tabla 3.19. Observaciones en el circuito de relevador basado en fototransistor.

15. Graficar ambas señales.
16. Realizar conclusiones correspondientes a las observaciones generales de ambos experimentos.

Desarrollo

Para ambas actividades, el voltaje de alimentación es el mismo, y se visualiza en el osciloscopio como se muestra a continuación:

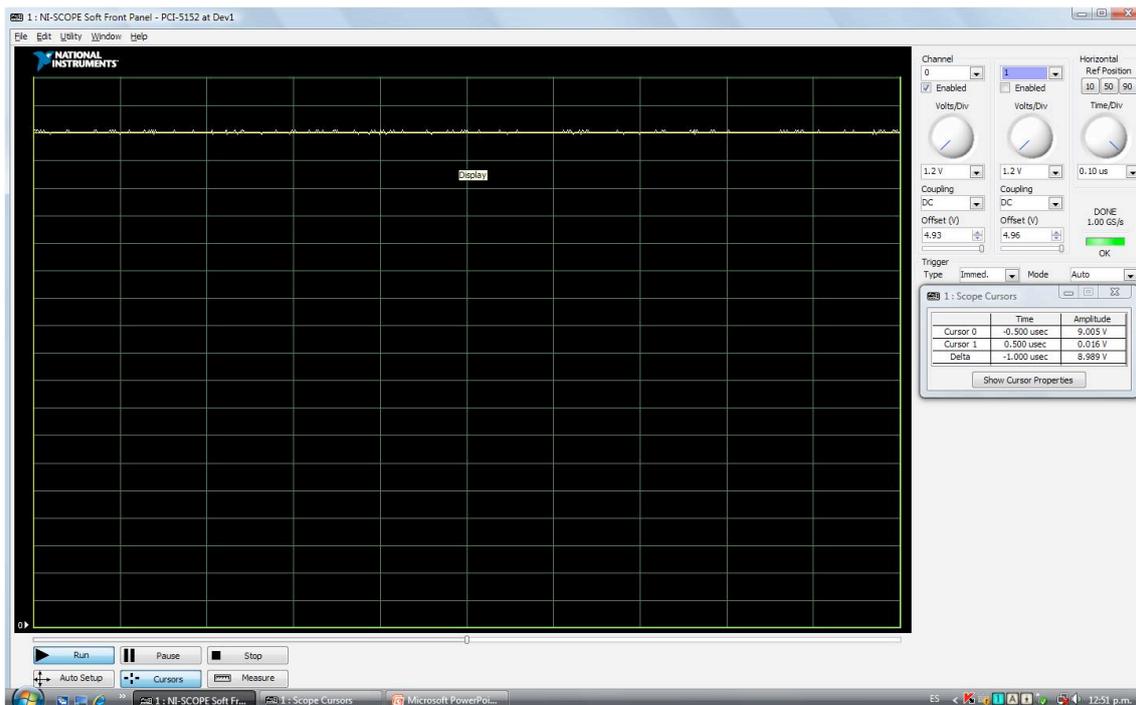


Figura 3.19. Voltaje de alimentación (9 V).

Actividad 1. Circuito relevador activado por luz, basado en fotorresistencia.

En el circuito armado se tienen un par de led's, dicho dispositivo está diseñado para que siempre encienda un led; esto es, al no estar iluminada la fotorresistencia, el led 1 está

encendido. Por el contrario, cuando ésta se ilumina, y la corriente que fluye por ella es mayor, las condiciones en el relevador cambian y se crea dentro de éste un “switchero”, es entonces cuando se apaga el led 1 para dar lugar al encendido del led 2.

En el caso de éste dispositivo, la resistencia del potenciómetro juega un papel importante en la sensibilidad de la fotorresistencia, lo cual definirá qué tan rápido responde a los cambios de luz.

Para poder visualizar dichos efectos en el osciloscopio, conectamos el canal 0 en paralelo al led 1, y el canal 1 en paralelo al led 2.

Los resultados de dichas pruebas se presentan a continuación:

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]	Resultado
Sin luz	2.524	8.096	Enciende V1
Con luz	9.006	2.667	Enciende V2

Tabla 3.20. Observaciones en el circuito de relevador basado en fotorresistor.

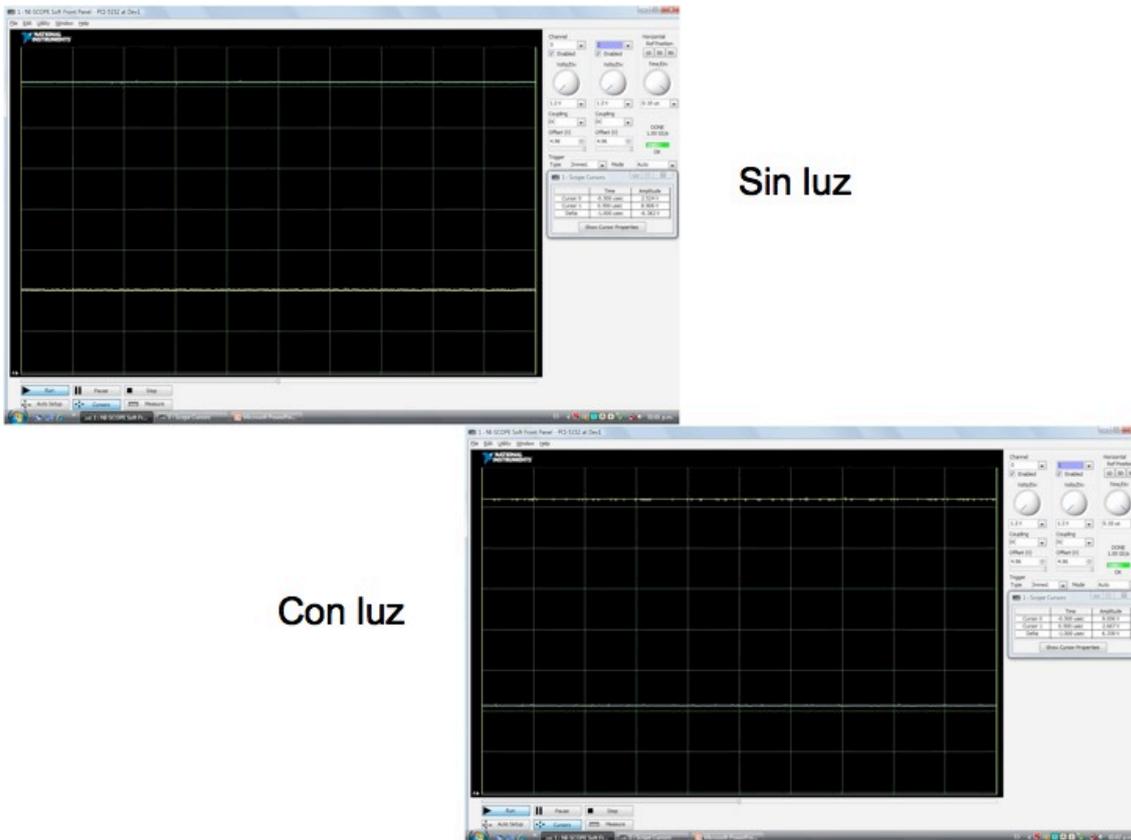


Figura 3.20. Resultados vistos en el osciloscopio para ambas condiciones.

Lo que se puede concluir, numéricamente, es que se observa en la tabla anterior el consumo del led que enciende.

Actividad 2. Circuito relevador activado por luz, basado en transistor.

El circuito de esta actividad cumple con el mismo propósito que el expuesto en la actividad anterior, con las modificaciones propias al tipo de dispositivo óptico a emplear, que en este caso se trata de un fototransistor.

Al igual que en la actividad anterior, en este caso, la resistencia del potenciómetro ayuda a ajustar la sensibilidad del fototransistor, causando el mismo efecto que en el caso de la fotorresistencia.

Para poder visualizar los efectos a través del osciloscopio, se conecta el canal 0 en paralelo al led 1, y el canal 1 en paralelo al led 2.

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]	Resultado
Sin luz	2.667	8.892	Enciende V1
Con luz	8.991	2.724	Enciende V2

Tabla 3.21. Observaciones en el circuito de relevador basado en fototransistor.

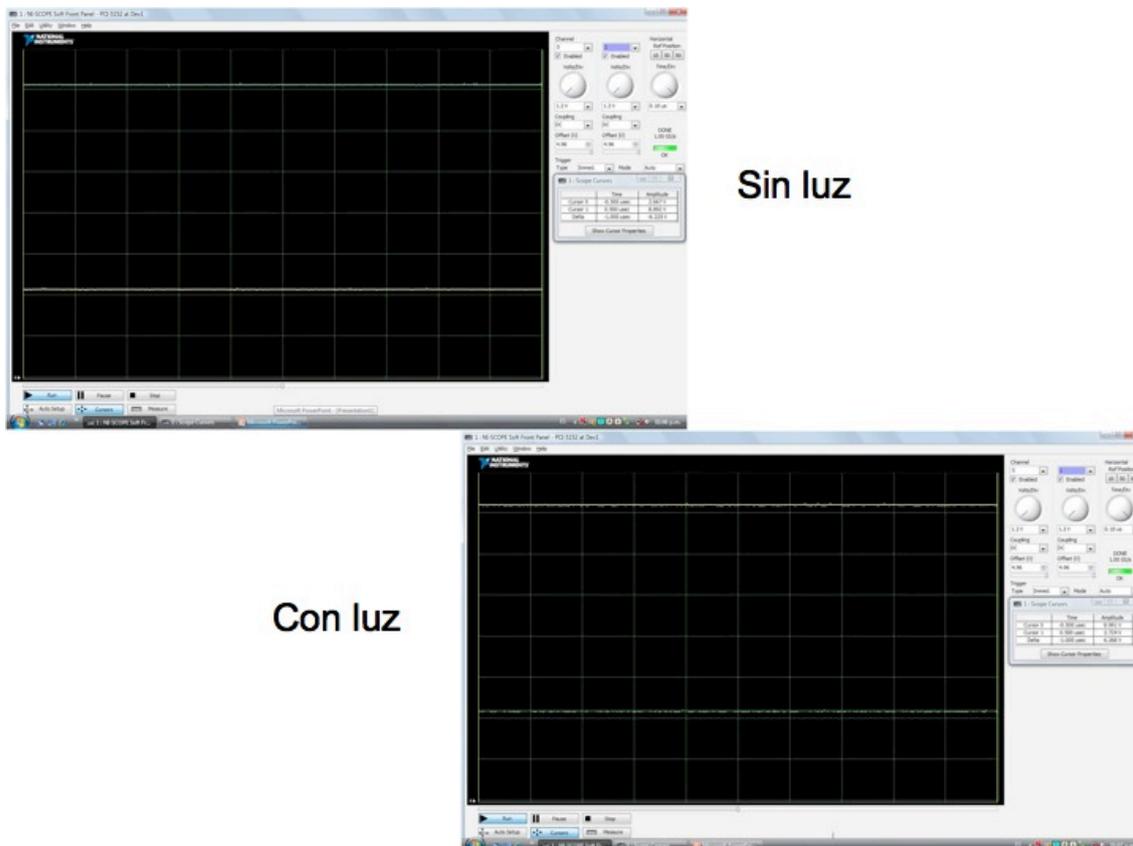


Figura 3.21. Resultados vistos en el osciloscopio para ambas condiciones.

En general, se observa que a través del empleo de dispositivos ópticos y un relevador es posible controlar con luz un sistema conformado por etapas, tal como se realizó en ambos experimentos.

3.7.3 Circuito de relevador desactivado por luz

Objetivos:

3. Familiarizar al experimentador con la optoelectrónica a través de la interacción de dispositivos ópticos, como el fotorresistor y el fototransistor, con dispositivos electromecánicos, tales como relevadores.
4. Comprender la interacción entre los dispositivos ópticos y los electromecánicos en el circuito de relevador desactivado por luz.

Introducción a la práctica

Al igual que en los circuitos de relevador activados por luz, existe la posibilidad de configurar circuitos de relevador desactivados con luz, que trabajen de manera inversa a los primeros, y que, además, puedan realizarse basados en fotorresistencias y fototransistores.

En la figura 3.22 se ilustra un circuito de relevador desactivado por luz, basado en fotorresistor, en el cual, el relevador es activado sólo cuando el fotorresistor está oscuro.

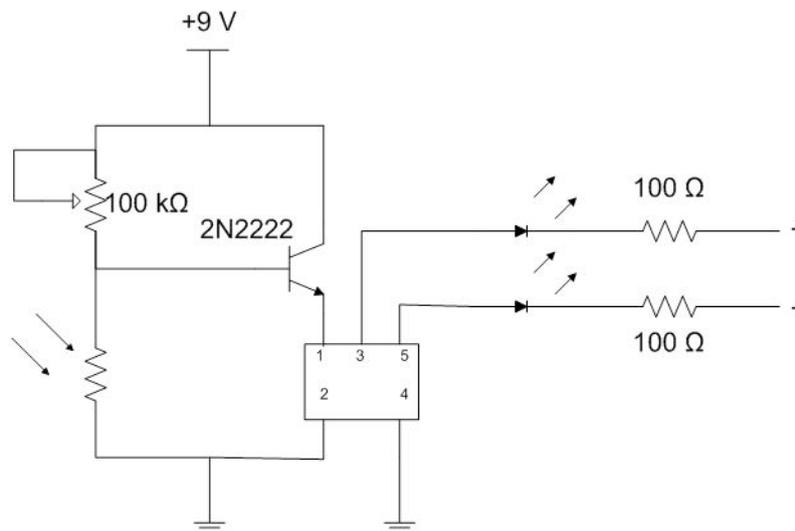


Figura 3.22. Circuito de relevador desactivado por luz, basado en fotorresistor.

En la figura 3.23 se presenta el circuito de relevador desactivado por luz basado esta vez en fototransistor, en el que el relevador es activado cuando Q1 está oscuro. La luz de Q1 desactiva el relevador, se calibra con el potenciómetro.

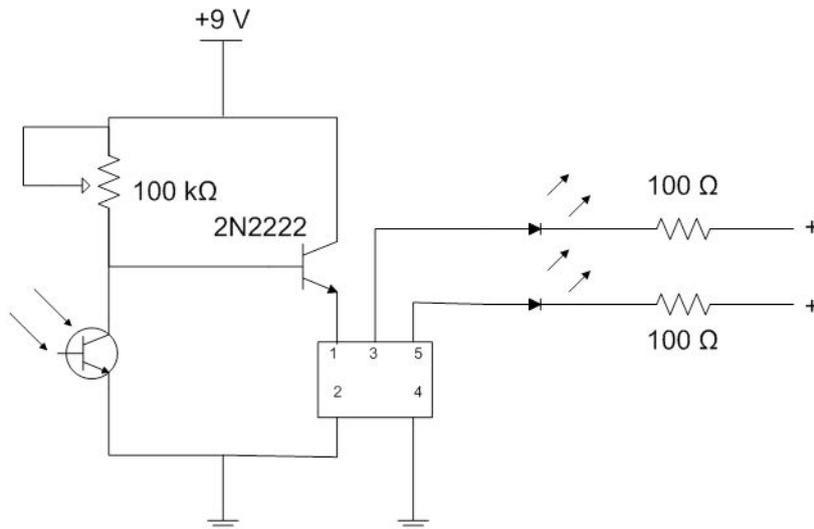


Figura 3.23. Circuito de relevador desactivado por luz, basado en fototransistor.

Material:

- 1 potenciómetro de 100 kΩ
- 1 relevador de 500 Ω, 6 V.
- 1 transistor 2N2222
- 1 fototransistor
- 1 fotorresistor
- 1 lámpara
- 1 osciloscopio

Procedimiento

Actividad 1. Circuito de relevador desactivado por luz basado en fotorresistencia.

17. Armar el circuito de la figura 3.22.
18. Observar que sin iluminar la fotorresistencia, un led debe estar encendido.
19. Iluminar el fotorresistor con la lámpara.
20. ¿Qué sucede cuándo se ilumina la fotorresistencia?
21. Manipular el potenciómetro para controlar la sensibilidad del fotorresistor.
22. Anotar las observaciones señaladas en la tabla 3.22.

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]
Sin luz		
Con luz		

Tabla 3.22. Observaciones en el circuito de relevador basado en fotorresistor.

23. Graficar ambas señales.
24. Realizar conclusiones respecto a lo observado en el relevador.

Actividad 2. Circuito de relevador desactivado por luz basado en fototransistor.

25. Armar el circuito de la figura 3.23.
26. Observar que sin iluminar el fototransistor, un led debe estar encendido.
27. Iluminar el fototransistor con la lámpara.
28. ¿Qué sucede cuando se ilumina el fototransistor con la lámpara?
29. Manipular el potenciómetro para controlar la sensibilidad del fototransistor.
30. Anotar las observaciones señaladas en la tabla 3.23.

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]
Sin luz		
Con luz		

Tabla 3.23. Observaciones en el circuito de relevador basado en fototransistor.

31. Graficar ambas señales.
32. Realizar conclusiones correspondientes a las observaciones generales de ambos experimentos.

Desarrollo

Para ambos circuitos se emplea el mismo voltaje de alimentación, cuyo valor en el osciloscopio se muestra a continuación:

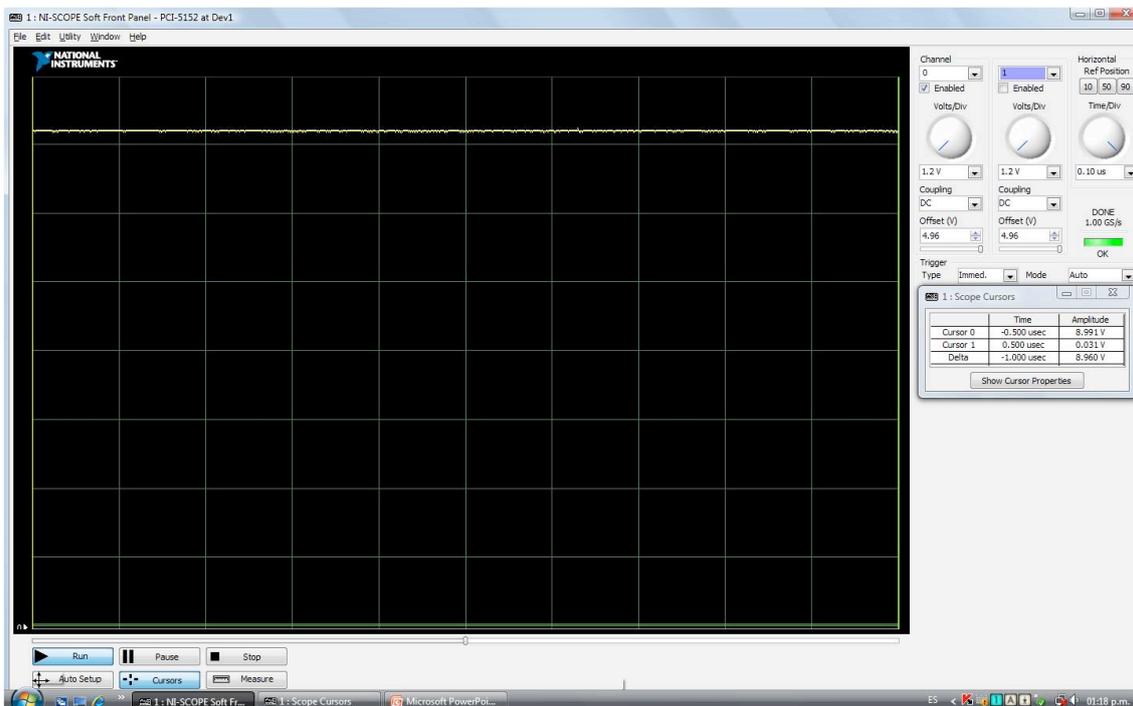


Figura 3.24. Voltaje de alimentación.

En esta ocasión, el dispositivo armado es el caso contrario al circuito relevador activado por luz, realizado en la Práctica 2, el potenciómetro mantiene la misma función sobre los dispositivos ópticos. De manera que lo que se obtiene en los dos casos expuestos en la presente práctica son lo inverso a lo obtenido en la Práctica 2.

Actividad 1. Circuito de relevador desactivado por luz basado en fotorresistencia.

Para fines de medición en la respuesta del relevador, se conecta el canal 0 en paralelo con el led 1 y el canal 1 en paralelo al led 2. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]	Resultado
Sin luz	8.991	2.681	Enciende V2
Con luz	2.538	8.906	Enciende V1

Tabla 3.24. Observaciones en el circuito de relevador basado en fotorresistor.

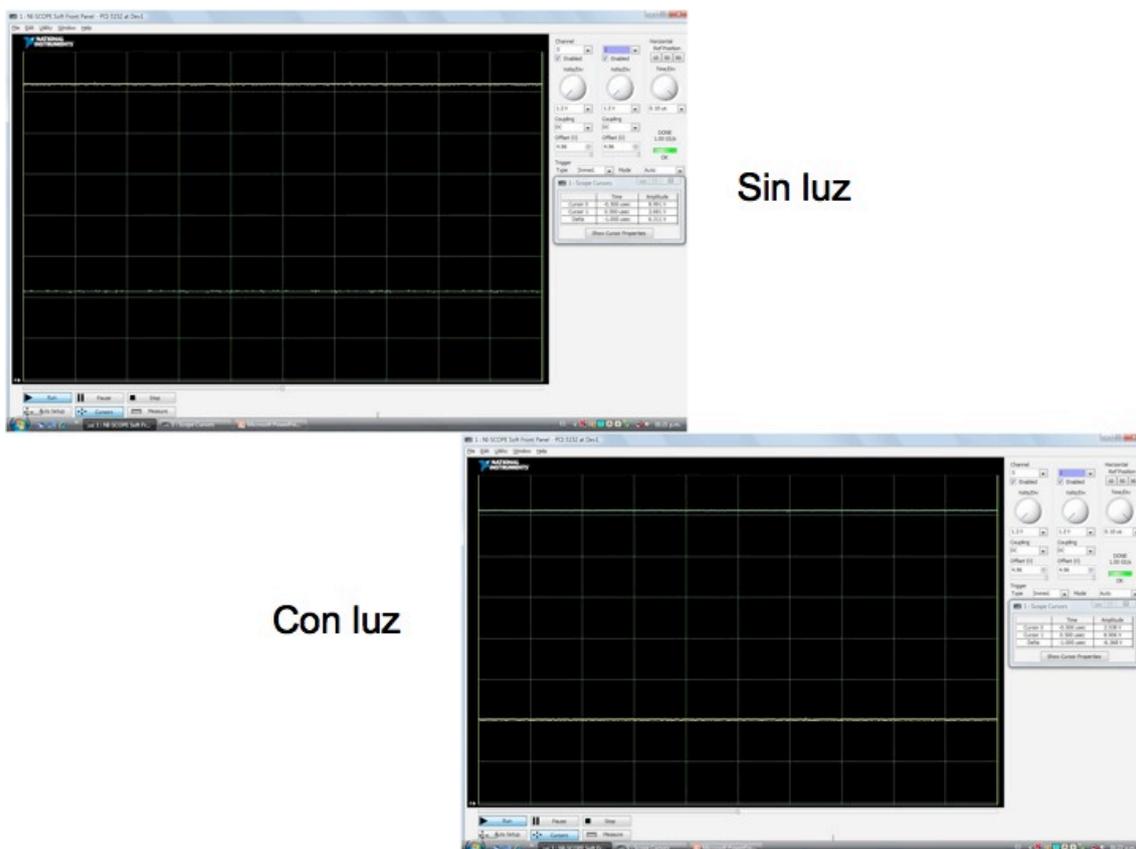


Figura 3.25. Respuesta en el relevador ante las variaciones de luz.

Se observa, que al iluminar la fotorresistencia se desactiva el led que se desea activado, dichos resultados están evidenciados por la caída de voltaje presentada en el canal correspondiente a dicho led.

Actividad 2. Circuito de relevador desactivado por luz basado en fototransistor.

Para poder observar la respuesta del relevador, se conecta el canal 0 en paralelo con el led 1 y el canal 1 en paralelo al led 2. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Condición	V ₁ [V]	V ₂ [V]	Resultado
Sin luz	8.991	2.681	Enciende V2
Con luz	2.538	8.906	Enciende V1

Tabla 3.25. Observaciones en el circuito de relevador basado en fototransistor.

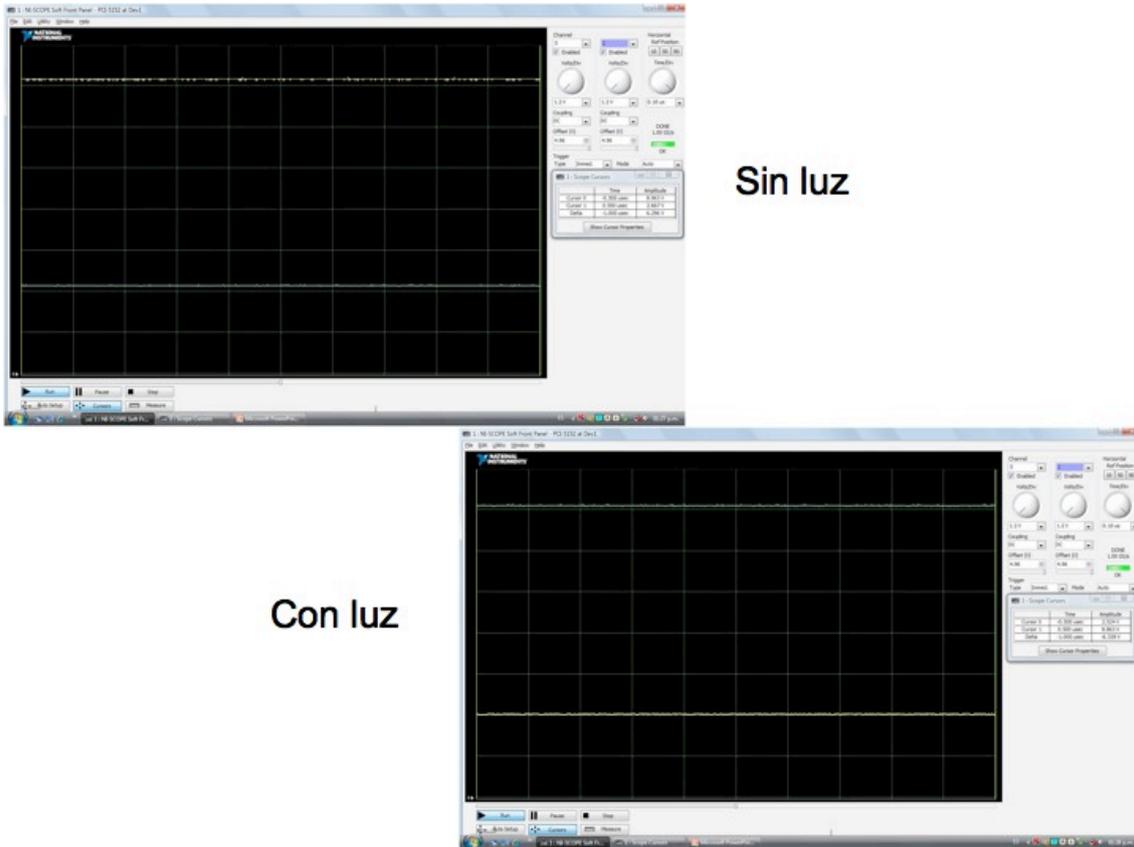


Figura 3.26. Respuesta del relevador ante las variaciones de luz.

En general, es posible emplear relevadores para activar circuitos que funcionan por etapas. En nuestro caso, la primer etapa está definida por los dispositivos ópticos, y la siguiente, por los led's. Sin embargo, la segunda etapa puede ser tan diversa como pueda imaginarse, siempre que se requiera un circuito que se cierre y se abra.

Bibliografía

[1] Anónimo, *Comunicaciones ópticas*

[2] Quimby, Richard S., *Photonics and Lasers (An Introduction)*, Wiley – Interscience, 2006.

[3] Chang, Kai, *Handbook of optical components and engineering*, Wiley – Interscience, 2003.