



Los componentes optoelectrónicos han tenido una amplia difusión en la electrónica moderna. Se han usado en gran medida en el proceso de conversión de energía mecánica en señales electrónicas y, por su funcionamiento como transformadores de señales ópticas en señales o energía eléctrica (corriente o voltaje) ayudando en la solución de muchos problemas. Como ejemplos de algunas aplicaciones clásicas se pueden mencionar las siguientes:

Barreras luminosas para el control de producción.

Dispositivos de protección

Aparatos de control y regulación luminosa.

Alarmas de incendio

Exploración de fichas y cintas perforadas

Posicionadores de máquinas herramientas (medición de longitudes, ángulos y posiciones)

Inspección de instrumentos ópticos y de procesos de encendido

Conversión de la energía luminosa en energía eléctrica.

Los transductores de luminosidad son fabricados de elementos semiconductores (silicio, germanio o arseniuro de galio), existen en particular tres tipos: fotodiodos, fotorresistencias y fototransistores.

Estos transductores son capaces de variar sus condiciones de operación eléctrica de acuerdo a la cantidad de luminosidad que incide sobre el semiconductor produciendo señales eléctricas que pueden ser interpretadas y manipuladas si son conectados adecuadamente a circuitos electrónicos.

El tipo radiación luminosa que pueden detectar los sensores varía de acuerdo con el material con el que se fabrican, de aquí que se puedan tener transductores que respondan al rango de la radiación ultravioleta, de la luz visible o del infrarrojo. La radiación luminosa se encuentra localizada en una región del espectro electromagnético cuyas velocidades de propagación son iguales en el vacío, diferenciándose por sus longitudes de onda y por consiguiente por su frecuencia ($C_0 = \lambda \gamma$, donde C_0 es la velocidad de propagación en el vacío, λ la longitud de onda y γ la frecuencia de la onda). Parte del espectro electromagnético en el que se encuentran las ondas de frecuencias mencionadas se muestra en la figura 1.

En la zona marcada como radiación luminosa de la figura 1 se hayan comprendidas las regiones infrarroja, visible y ultravioleta, en donde la región visible es la que detecta el ojo humano, estando sus límites en aproximadamente las longitudes de onda de $0.43 \mu m$ y $0.63 \mu m$.

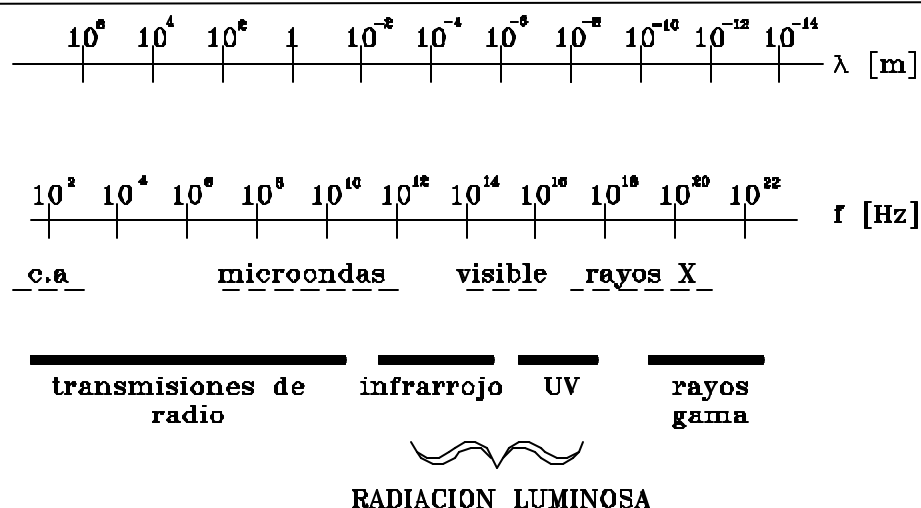


Figura 1. Espectro en frecuencia algunas ondas electromagnéticas.

Materiales semiconductores

En general los elementos se pueden clasificar en tres grupos:

- Materiales aislantes
- Materiales conductores
- Materiales semiconductores

Los átomos de éstos materiales forman estructuras cristalinas y sus electrones se agrupan en niveles de energía, los cuales a su vez forman dos bandas: la banda de valencia y la banda de conducción.

La banda de valencia está formada por los electrones que necesita el átomo del material para ser eléctricamente neutro; mientras que la banda de conducción está compuesta por los electrones que pertenecen a átomos que habiendo completado su último orbital, compartiendo sus electrones con los átomos cercanos, se pueden desprender del átomo con una pequeña energía. En la figura 2 se muestran las bandas de niveles de energía para los tres tipos de materiales, en la que se observa que para los aislantes la banda de conducción se encuentra vacía y la de valencia llena, para los conductores la banda de valencia se encuentra llena y la banda de conducción contiene una gran cantidad de electrones con posibilidad de moverse, y para los materiales semiconductores se observa que la banda de valencia se encuentra semillena, encontrándose el resto de los electrones en la banda de conducción.

Hay que mencionar que para los tres tipos de materiales en estado puro, el potencial necesario para arrancar del átomo a un electrón de la banda de valencia debe ser muy grande, con lo que, antes de mover al electrón se rompería la estructura cristalina. En el caso particular de los conductores, en la banda de conducción se encuentran una gran cantidad de electrones, por lo que al someter el material a un potencial éstos pueden moverse fácilmente.

Los átomos de los materiales semiconductores son de valencia 4, por lo que la red cristalina que forma es en forma de un tetraedro, completando su último orbital con la formación de enlaces covalentes con los átomos vecinos. En la figura 3 se muestra la estructura cristalina para los átomos de los materiales semiconductores. Los materiales semiconductores, en particular, tienen poca capacidad de conducción en estado puro, sin embargo si se modifica la estructura cristalina agregando átomos de otros elementos (por difusión) durante el proceso de fabricación (de forma

tal que los átomos de la mezcla pertenezcan del todo al cristal), se puede lograr que la distancia energética que existe entre las bandas de valencia y de conducción se reduzca y por tanto el salto de los electrones de la banda de valencia a la de conducción puede ser provocado por potenciales pequeños (en el caso de los dispositivos optoelectrónicos es posible por medio de radiación luminosa).

El comportamiento del material semiconductor puede cambiar de acuerdo con el elemento que se agregue, de tal forma que si el material es de valencia 5 (comunmente se usan antimonio, azufre ó fósforo), en la estructura cristalina se formarán con los átomos de ambos materiales cuatro enlaces con los electrones de ambos y un electrón del átomo de impureza quedará atado con menos fuerza, si esto sucede con todos los átomos de la estructura, entonces el material contendrá una gran cantidad de portadores (donores ó cargas libres); este material recibe el nombre de material tipo N.

Cuando al material semiconductor se le agrega un material de valencia 3 (comunmente se usan aluminio, boro, galio o indio), en la estructura cristalina se formarán, con los electrones de los átomos de ambos materiales, tres enlaces, quedando sin cubrir una carga positiva, con lo que el material contará con una gran cantidad de átomos aceptores (huecos); el material descrito es llamado material tipo P.

El material tipo N se dice que contiene cargas positivas fijas y cargas negativas móviles, mientras que el material tipo P tiene cargas negativas fijas y cargas positivas móviles. Por lo general con los semiconductores se elaboran dispositivos electrónicos a partir de la unión de dos o más de estos materiales, como ejemplos se pueden mencionar los diodos con unión P-N y los transistores con uniones P-N-P y N-P-N. Otra manera de hacer que en el material semiconductor existan mayor número de portadores libres es aumentando la temperatura del cristal, sin embargo, la cantidad de donores o aceptores producidos es muy pequeño.

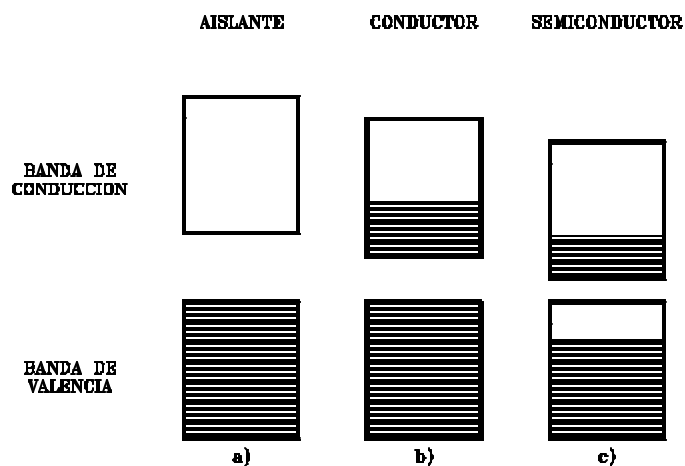


Figura 2. Bandas de niveles de energía para los aislantes (a), los conductores (b) y los semiconductores (c)

Fotoconductividad

Los potenciales usados para hacer que los materiales semiconductores entren en la región de conducción, son obtenidos de fuentes de voltaje de corriente continua, sin embargo en el caso particular de los transductores de luminosidad se usa el "Efecto Fotoeléctrico", que consiste en la generación de pares electrón-hueco en los semiconductores cuando estos materiales se hallan expuestos a radiaciones luminosas, aumentando de esta forma la propia conductividad (fotoconductividad).

La fotoconductividad se explica considerando que la conductividad de un material es proporcional a la concentración de portadores de carga presentes.

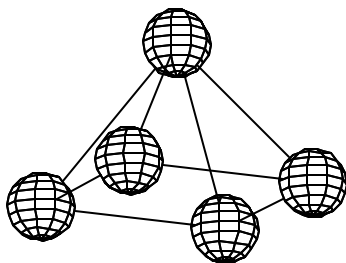


Figura 3. Formación cristalina de los semiconductores, en forma de tetraedro

La energía radiante que llega hasta un elemento de material semiconductor provoca la ruptura de los enlaces covalentes, generando pares hueco-electrón en exceso respecto a los que se crean por agitación térmica.

El incremento de los portadores de carga hace disminuir la resistividad del material; aumentando de este modo la conductividad.

Si un material semiconductor con impurezas (ya sea donoras o aceptoras) es alcanzado por un fotón (de suficiente nivel energético), se producen pares electrón-hueco; dando lugar, así, a la excitación intrínseca, un fotón puede excitar a un electrón donador a la banda de conducción, del mismo modo que un hueco de valencia puede ser llevado al nivel de aceptor, conociéndose estos dos fenómenos como transición de impurezas. Las transiciones provocadas por un fotón de suficiente nivel energético se indican en el diagrama de energía de la figura 4.

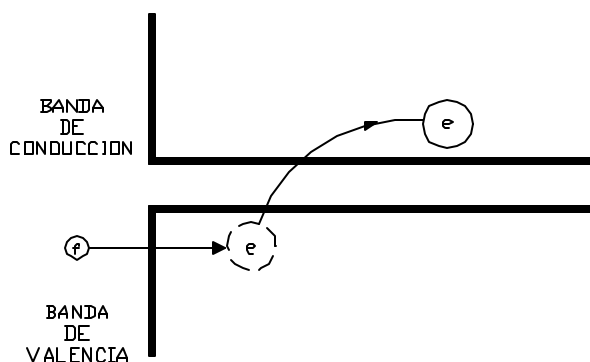


Figura 4. Fotoexcitación en un semiconductor.

Fotorresistencias.

También se les llama fotoconductores o celdas fotoconductoras, son componentes pasivos de semiconductores privados de uniones. Cuando son expuestos a una radiación luminosa su resistencia varía debido al efecto fotoconductor.

En la oscuridad los fotorresistores se comportan como aislantes, presentando valores de resistencia del orden de los megaohms, por el contrario si son iluminados intensamente su resistencia decrece al orden de los ohms, aumentando así su conductividad.

En el caso de esta práctica se usa la fotorresistencia NSL-467, sus principales características son las siguientes:

1. La respuesta espectral corresponde a una longitud de onda de 0.55μ (zona del espectro visible)

2. La Resistencia sin radiación luminosa (resistencia oscura) $4\text{ M}\Omega$.

3. Voltaje máximo de pico 250 volts y potencia máxima 100 mW.

Fotodiodos

Los fotodiodos son dispositivos semiconductores que contienen una unión p - n. En la oscuridad se comporta como un diodo normal, tanto polarizado en directa como en inversa. Al exponer la unión (con polarización inversa) a una radiación luminosa, se puede observar un aumento de portadores minoritarios (huecos en el material n y electrones en el material p) por lo que la corriente inversa aumenta proporcionalmente a la intensidad luminosa.

El fotodiodo usado es el TIL 38 con las siguientes características:

1. Corriente oscura 50 nA, con un voltaje de inversa de 10 V

2. Potencia disipada 150 mW.

Fototransistor

El fototransistor es un dispositivo cuya base es fotosensible, encontrando su mayor sensibilidad espectral próxima al extremo infrarrojo del espectro visible, de aquí que sean usados para detectar la luz emitida por lámparas incandescentes.

Cuando uno de estos dispositivos se expone a una radiación, a través del colector circula una corriente proporcional a dicha radiación.

El fototransistor usado en la práctica es un transistor tipo NPN TL 81, sus principales características son:

1. Corriente oscura $20\text{ }\mu\text{A}$ a una polarización de 10 V y con corriente de base de $I_B = 0$.

2. Voltaje colector emisor de saturación 0.2 V.

DESCRIPCION DEL EQUIPO.

La práctica se desarrollará en dos etapas, en la primera se estudiará la respuesta de una fotorresistencia, un fotodiodo y un fototransistor, mientras que en la segunda se emplea un control de luminosidad usando los fotosensores.

El equipo a usar en la primera parte es el módulo G11 (que contiene los circuitos de polarización) y la unidad luminosa TY 12/EV (donde están los sensores y la fuente de iluminación).

Los fotosensores están colocados en la unidad luminosa TY 12/EV, el conector usado permite que no sean polarizarlos accidentalmente en inversa. La fuente de radiación luminosa es una lámpara incandescente, que puede ser desplazada y con ello variar la intensidad luminosa que incide sobre los sensores. Para reducir los efectos causados por la reflexión, las paredes de la unidad TY 12/EV son de color negro. La figura 5 muestra la posición de los sensores de iluminación y las posiciones en las que es posible colocar la fuente de radiación.

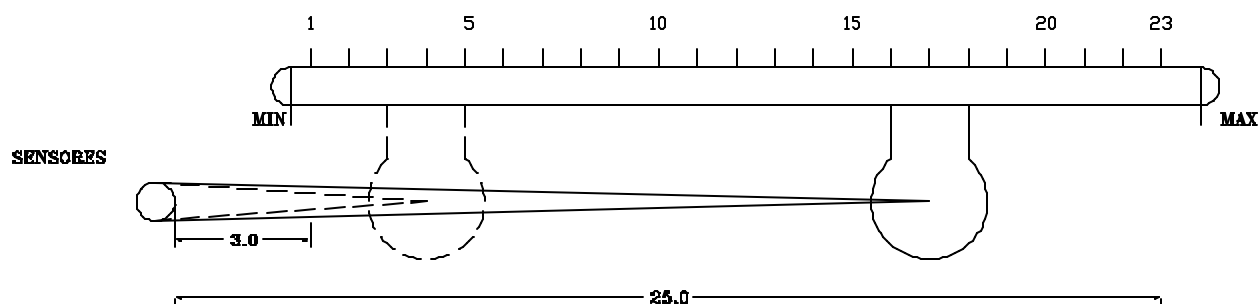


Figura 5. Posición de los sensores de iluminación y de la fuente de radiación en la unidad TY12/EV.

La lámpara usada tiene filamento de tungsteno y se alimenta con 24 Volts dc, la intensidad luminosa que presenta es de 3 candelas (1 candela = $1 \frac{\text{lumen}}{\text{estereorradián}}$), tiene 3 mm de lado, por lo que se puede considerar como puntual cuando se halle a más de 3 cm del sensor. Tomando esta hipótesis y la potencia que absorbe la lámpara (3.696 watts) puede calcularse el valor de la irradiación de la siguiente forma:

$$H_T = \frac{P_{irr}}{4 \pi d^2} = \frac{3.5}{4 \pi d^2}$$

Donde: H_T es la irradiación

P_{irr} es la potencia irradiada

En la unidad TY 12/EV se indican las distancias que separan la lámpara del sensor. La posición 1 corresponde a una distancia efectiva de 3 cm y la posición 23 a 25 cm. En la tabla 1 se muestran los valores de iluminación que corresponde a cada posición de la lámpara.

Los circuitos de polarización y conexiones están en el módulo G11 en el que se tienen las conexiones que se muestra en la figura 6.

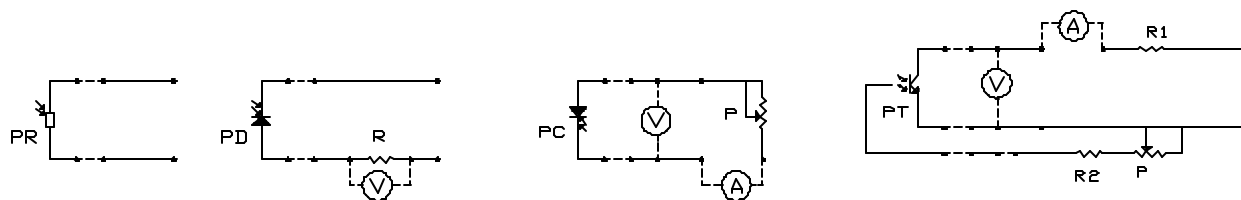


Figura 6. Circuitos de polarización del módulo G11.

Para el transductor foterresistivo PR no es necesario un circuito de polarización, debido a que se medirá la variación de la resistencia al variar la intensidad luminosa que incide sobre éste.

El fotodiodo PD ha sido polarizado en inversa (0-30 Volts) con una resistencia en serie de $100 K\Omega$ como carga. Los cambios de corriente inversa debidos a las variaciones de irradiación provocan en la resistencia una variación en la caída de voltaje, la que puede medirse con el voltmetro.

El fototransistor PT está conectado como emisor común, como carga se conectó al colector una resistencia R1 de 560Ω y puede ser polarizado entre 0 y 30 V.

POSICION DE LA LAMPARA	DISTANCIA EFECTIVA (mm)	IRRADIACION $(\mu W/mm^2)$
30	22.92	5.599
35	27.90	3.778
40	31.36	2.991
45	37.08	2.139
50	45.15	1.655
55	47.40	1.309
60	52.11	1.083
65	56.15	0.933
70	62.37	0.756
75	67.48	0.646
80	72.25	0.563
85	77.11	0.495
90	80.63	0.452
95	85.69	0.401
100	90.51	0.359
105	95.93	0.320
110	100.66	0.290
115	106.03	0.262
120	110.35	0.242
125	115.96	0.219
130	120.18	0.204
135	126.19	0.185
140	130.53	0.173
145	136.37	0.158
150	140.80	0.148
155	145.92	0.138
160	151.20	0.129
165	155.10	0.122
170	160.12	0.115
175	164.73	0.108
180	170.49	0.101
185	175.48	0.096
190	180.30	0.090
195	185.73	0.085
200	190.15	0.081
205	195.17	0.077
210	201.43	0.072
215	205.17	0.070
220	210.27	0.067
225	215.28	0.063
230	220.45	0.061

Tabla 1.

La base se conecta a tierra a través de una resistencia R2 de $3900\ \Omega$ en serie con el potenciómetro P de $1\ M\Omega$. La corriente del colector y el voltaje colector - emisor (dependen de la irradiación) se miden con el amperímetro y voltímetro respectivamente. Al variar el valor del potenciómetro se puede variar la sensibilidad del fototransistor.

La segunda parte de la práctica se desarrollará usando el módulo G12, el cual se muestra en la figura 8, consiste en la aplicación de los fotosensores en un controlador de luminosidad de malla cerrada. La función principal de estos controladores es lograr una iluminación lo más estable posible en relación a una de referencia.

En la figura 7 se muestra el diagrama a bloques del sistema de control a usar, en él se puede observar que la señal "s", se obtiene de los fotosensores, y es proporcional a la luminosidad del ambiente que se controla. Dicha señal después de pasar por un codificador, es comparada con una señal de referencia "r"; a la diferencia entre estas señales se le denomina señal de error "e" ($e = r - s$). La señal de error se introduce al regulador R, del que se obtiene la señal de control "m", misma que se suministra al actuador (Interface y Grupo de Potencia) con el objeto de proporcionar una mayor o menor cantidad de luminosidad.

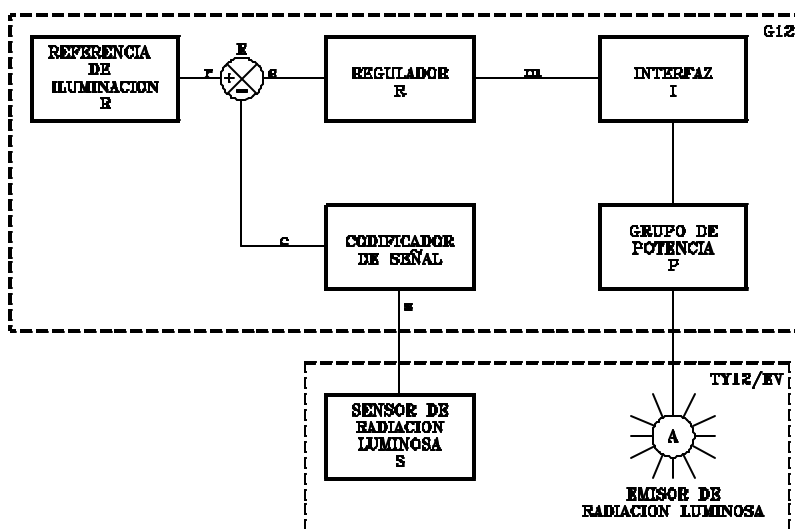


Figura 7. Diagrama de bloques del controlador de intensidad luminosa.

El controlador de luminosidad empleado (módulo G12) es del tipo Proporcional-Integral (PI), implementado con un amplificador operacional, cuya configuración se muestra en la figura 9.

El actuador genera la señal que se proporciona a la fuente de iluminación (que es la lámpara incandescente de 3 candelas LX1), que se ubica en el módulo de luminosidad TY12/EV, éste a su vez, contiene otra lámpara que se alimenta con una fuente variable de 0 a 24 V de corriente directa (LX2), que se usa para simular cargas de diferentes intensidades, así como para ver el comportamiento del controlador cuando se le conecta como sensor una fotorresistencia o fototransistor.

En el módulo G12 se controla un dispositivo electrónico llamado triac, el cual mediante un pulso (que es generado por el actuador), permite el paso de una señal de potencia de corriente alterna, la cual alimenta a la lámpara LX1. El pulso generado tiene una duración variable, la que dependerá de la intensidad luminosa en el fotosensor, la señal que se observaría en el osciloscopio sería una señal senoidal recortada (como la mostrada en la figura 10), la señal original tiene un período de 180 grados de tal forma que la señal recortada se estudia de acuerdo al ángulo de disparo en el cual la señal está presente en la lámpara. La unidad luminosa TY 12/EV cuenta con una lámpara marcada con LX2, que servirá para dar perturbaciones al sistema.

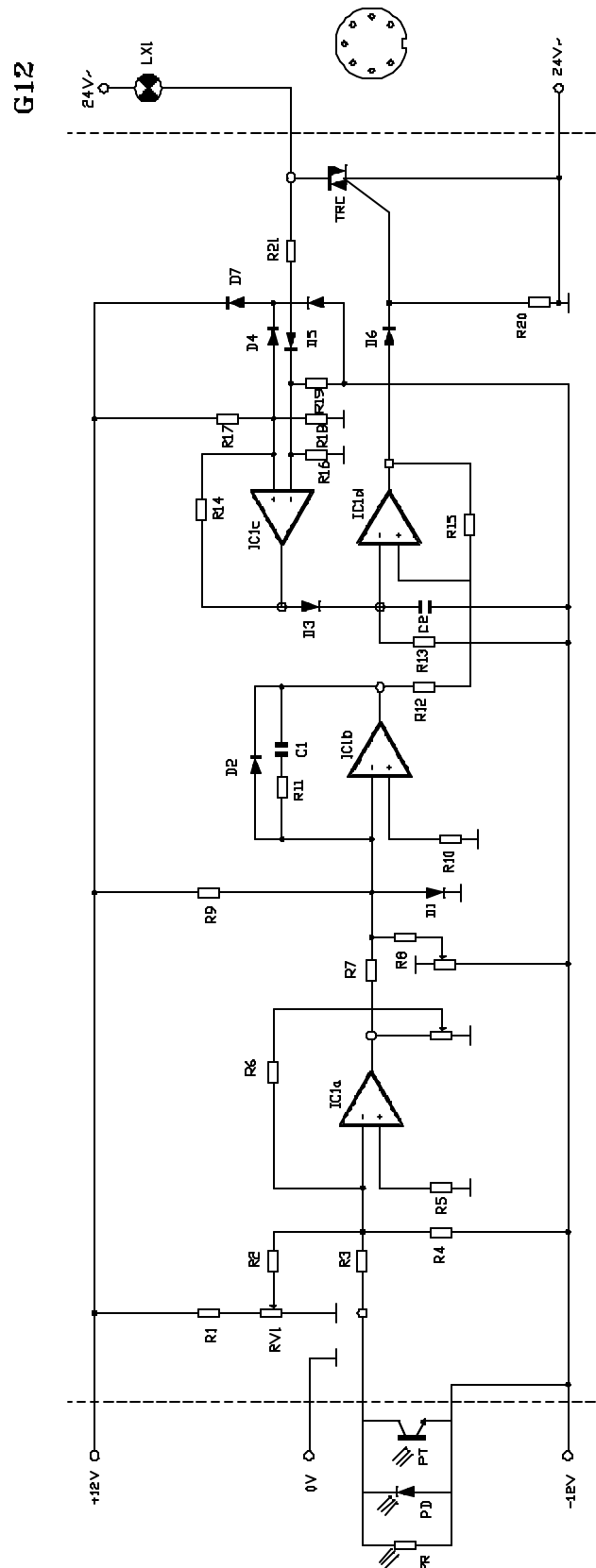


Figura 8

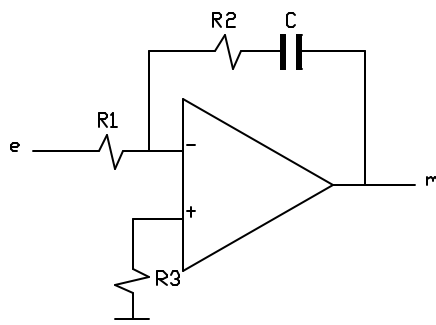


Figura 9. Circuito de control PI

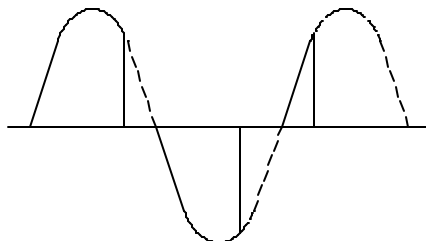


Figura 10. Señal senoidal recortada

OBJETIVO:

Relacionar al alumno con transductores de radiación luminosa, así como con sus principales características y aplicaciones.

EQUIPO.

1 Fuente de alimentación PS1

2 Multímetros digitales.

1 Unidad luminosa TY 12/EV

1 Módulo G11

1 Módulo G12

1 Osciloscopio

Cables de conexión.

DESARROLLO.

- Conecte los bornes de la lámpara LX1 de la unidad luminosa TY 12/EV a las terminales de 12 y -12 volts de la fuente PS1 para alimentar la lámpara con 24 Vcd.
 - Una vez que esté seguro de que las conexiones pedidas son las correctas para cada experimento, encienda la fuente y deje funcionar el equipo durante 3 minutos, con el fin de que los componentes alcancen la estabilidad térmica.
-

EXPERIMENTO 1. DETERMINACION DE LA CURVA CARACTERÍSTICA RESISTENCIA - IRRADIACIÓN DEL FOTORRESISTOR.

- Conecte el multímetro digital, como óhmetro, en los bornes 1 y 2 del módulo G11.
- Conecte el módulo G11 a la unidad luminosa TY 12/EV, mediante el cable correspondiente, a la terminal marcada como Photo Resistor.
- Coloque la lámpara LX1 en la posición marcada con 230 mm.
- Mida el valor de resistencia y repita la medición de resistencia, acercando 10 mm la lámpara LX1 hasta la posición 30 mm, anote los datos en la tabla 2.

Posición de la Lámpara	Resistencia (Ω)
230	
220	
210	
200	
190	
180	
170	
160	
150	
140	
130	
120	
110	
100	
90	
80	
70	
60	
50	
40	
30	

Tabla 2

EXPERIMENTO 2. DETERMINAR LA CURVA CARACTERISTICA CORRIENTE INVERSA - IRRADIACIÓN DEL FOTODIODO.

- Conecte los bornes 4 (+) y 5 (-) a una fuente variable de 30 Vcd.
 - Conecte el multímetro digital, como voltmetro, a los bornes 3 y 5 (resistencia R).
 - Cambie el cable de conexión entre los dos módulos a la terminal marcada como "Photo Diode" de la unidad luminosa.
-

-
- Coloque la lámpara LX1 en la posición marcada con 230 mm.
 - Mida el valor de voltaje a partir de 230 mm, acercando la lámpara al transductor 10 mm cada vez, anotando los datos y calcule el valor de la corriente que pasa por la resistencia R en la tabla 3, tome en cuenta que el valor de la resistencia es de $100\text{ K}\Omega$.

LAMPARA	V	I μA
230		
220		
210		
200		
190		
180		
170		
160		
150		
140		
130		
120		
110		
100		
90		
80		
70		
60		
50		
40		
30		

Tabla 3

EXPERIMENTO 3. DETERMINAR LA FAMILIA DE CURVAS CARACTERISTICAS CORRIENTE DE COLECTOR EN FUNCION DEL VOLTAGE COLECTOR-EMISOR CON IRRADIACION CONSTANTE DEL FOTOTRANSISTOR.

- Conecte los bornes marcados con 14 (+) y 15 (-) a una fuente variable de 30 Vcd.
 - Cambie la conexión a la terminal marcada como "Photo Transistor", en la unidad luminosa.
 - Conecte un multímetro, como amperímetro, entre los bornes 9 y 13 del panel, en él se medirá la corriente de colector, y entre los bornes 9 y 10 coloque otro multímetro, como voltímetro, en el que se medirá el voltaje colector-emisor.
 - Coloque la lámpara en la posición de 60 mm.
 - Varíe el valor del voltaje como se indica en la tabla 4 y complete los valores de voltaje y corriente.
 - Repita las mediciones para las siguientes posiciones de la lámpara, 100 mm, 150 mm y 230mm.
-

POSICION DE LA LAMPARA=			POSICION DE LA LAMPARA=			POSICION DE LA LAMPARA=			POSICION DE LA LAMPARA=		
Vcc	Vce	Ic	Vcc	Vce	Ic	Vcc	Vce	Ic	Vcc	Vce	Ic
0			0			0			0		
1			1			1			1		
2			2			2			2		
3			3			3			3		
4			4			4			4		
5			5			5			5		
6			6			6			6		
7			7			7			7		
8			8			8			8		
9			9			9			9		
10			10			10			10		
11			11			11			11		
12			12			12			12		
13			13			13			13		
14			14			14			14		
15			15			15			15		
16			16			16			16		
17			17			17			17		
18			18			18			18		
19			19			19			19		
20			20			20			20		
21			21			21			21		
22			22			22			22		
23			23			23			23		
24			24			24			24		
25			25			25			25		

Tabla 4

EXPERIMENTO 4. APLICACION DE FOTOSENSORES EN UN PROCESO DE CONTROL DE LUMINOSIDAD.

Nota: Este experimento deberá ser realizado en su totalidad por el profesor.

- Para calibrar el módulo G12, conecte la fuente de corriente alterna a los bornes marcados con +24 V y -24 V.
- Polarice con las fuentes correspondientes las terminales marcadas con +12 V, -12 V y 0 V.
- Conecte la fuente variable de corriente directa a los bornes marcados como LX2 del módulo TY12/EV
- Conecte con el cable correspondiente los módulos G12 y TY12/EV, a la terminal que corresponde a la fotorresistencia.

- Conecte el multímetro al borne 2 del módulo y coloque el cursor de la unidad luminosa en la posición de 130 mm (la calibración se realiza del mismo modo para los tres fotosensores).
- Regule RV1 hasta que el voltaje en el borne 2 sea de 0V (observar esto en el multímetro), con el cursor del potenciómetro P todo a la izquierda.
- Desplace el potenciómetro P del módulo G12 todo a la izquierda (posición mínima, 0%) siempre que cambie de transductor.
- Con la fuente variable de voltaje en posición de 0 V y con la fuente apagada separe la tapa del módulo TY12/EV (girando los seguros en forma de tornillo), colocando el cursor a 5 cm de los transductores aproximadamente.
- Encienda la fuente y gire el potenciómetro P del módulo G12, muy lentamente a la derecha de forma tal que la lámpara LX1 encienda a una intensidad tal que no lastime la vista.
- Sin mover la posición de las lámparas aumente el voltaje de la fuente variable lentamente y anote sus observaciones.
- Repita el experimento para el fotodiodo y el fototransistor.

Análisis de Resultados

- 1.- Con base en los datos obtenidos de la tabla 2 trace la curva característica del fotorresistor (resistencia contra irradiación).
- 2.- Con base en los datos obtenidos de la tabla 3 trace la curva característica del fotodiodo (corriente inversa contra irradiación).
- 3.- Con base en los datos obtenidos de la tabla 4 trace las curvas características del fototransistor (corriente de colector en función del voltaje colector-emisor con irradiación constante) indicando en cada caso el valor de irradiación correspondiente.
- 4.- Explique brevemente el proceso de control de iluminación de el experimento 4.
- 5.- Reporte sus comentarios y conclusiones del desarrollo de la práctica.