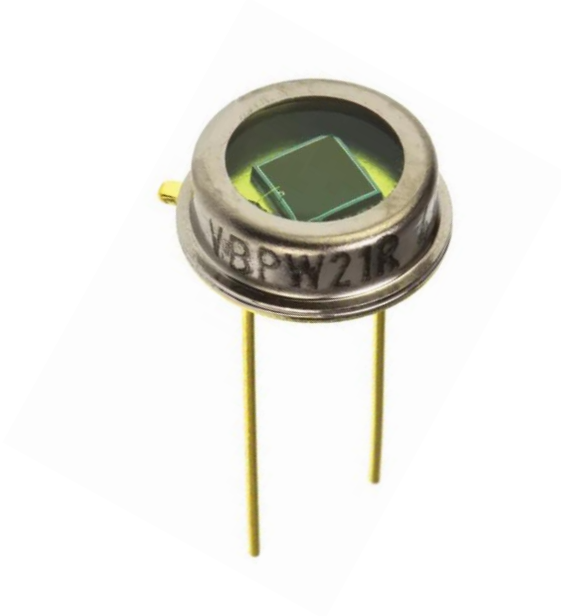
UNIVERSIDAD DE BURGOS

Tema 4: Dispositivos optoelectrónicos

José M. Cámara y Miguel Cantera

(checam@ubu.es y macantera@ubu.es)

V 2.3



Introducción

- Como su nombre indica, combinan electrónica y óptica.
- Habitualmente se trata de dispositivos semiconductores.
- Su funcionamiento se basa en la teoría ondulatoria y la mecánica cuántica (efecto fotoeléctrico).
- Podemos distinguir 3 categorías:
  - Emisores de luz.
  - Receptores de luz.
  - Emisores – receptores de luz (optoacopladores).

Principio físico

- Un semiconductor presenta una banda de conducción y una banda de valencia.
- Entre ellas existe una banda prohibida cuya anchura se mide en términos de energía (E_g).
- Cuando un electrón “cae” de la banda de conducción a la banda de valencia libera la energía que separa ambas bandas.
- Según la teoría cuántica: $E_g = h*\nu$.
  - h: constante de Planck.
  - ν: frecuencia de la radiación emitida.
- Si la frecuencia de la radiación emitida se encuentra dentro del espectro de la radiación luminosa, se produce la emisión de luz.
- El efecto contrario también es posible: una radiación luminosa estimula los electrones de la banda de valencia que adquieren la energía necesaria para superar la banda prohibida y “saltar” a la de conducción, produciendo la entrada del semiconductor en conducción.

Dispositivos emisores de luz

Dentro de los dispositivos semiconductores, aquellos que son capaces de emitir luz pertenecen a la categoría de los diodos:

- Diodos LED.
- Diodos LASER (no los vamos a estudiar).

Como se ha comentado, la característica fundamental es que la anchura de la banda prohibida haga que la radiación emitida se corresponda con energía lumínica.

Esta circunstancia depende del material semiconductor empleado, al igual que el color de la luz emitida.

La excitación se puede realizar:

- En continua.
  - Serie
  - Paralela
- Por modulación de anchura de impulsos.
- En alterna.

Diodos LED (I)

Materiales

Compuesto	Color	Long. de onda
Arseniuro de galio (GaAs)	Infrarrojo	940nm
Arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs)	Rojo e infrarrojo	890nm
Arseniuro fosfuro de galio (GaAsP)	Rojo, naranja y amarillo	630nm
Fosfuro de galio (GaP)	Verde	555nm
Nitruro de galio (GaN)	Verde	525nm
Nitruro de galio e indio (InGaN)	Azul	450nm
Carburo de silicio (SiC)	Azul	480nm

Vf

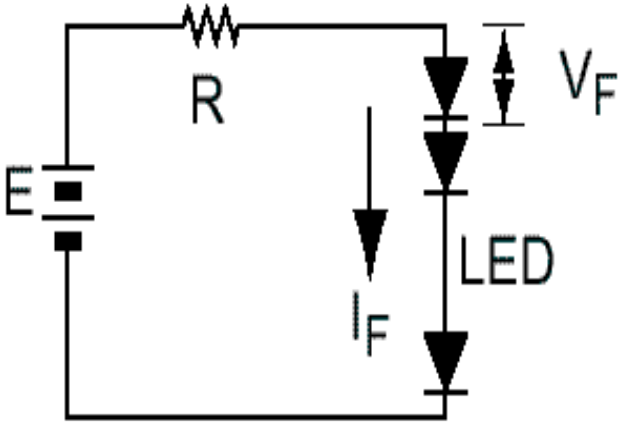
Rojo = 1,6V
Rojo alta luminosidad = 1,9V
Amarillo = 1,7V a 2V
Verde = 2,4V
Naranja = 2,4V
Blanco brillante = 3,4V
Azul = 3,4V
Azul 430nm = 4,6V

$$\lambda(m) = \frac{c}{f} \approx \frac{3 \times 10^8\ {}^{m}/_{s}}{f(Hz)}$$

Para los LED blancos se utiliza la temperatura de color, que refleja el tono que adquiere la luz blanca que emiten (cálido 2700K-3500K, natural 4000K-4500K, luz diurna 5000K-6000K, frío 6000K-7000K).

Diodos LED (II)

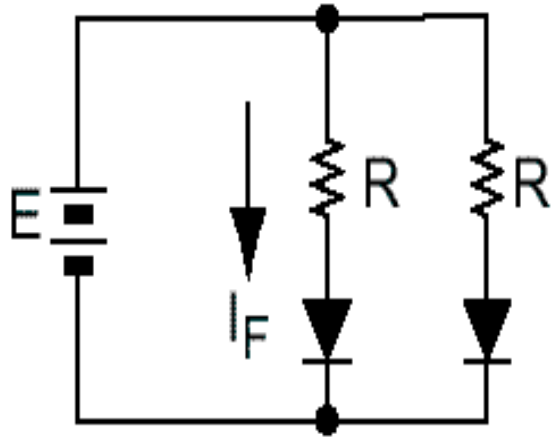
Excitación serie



$$I_F = \frac{E - n V_F}{R}$$

EXCITACIÓN DE n LEDs EN SERIE MEDIANTE UNA BATERIA DE c.c.

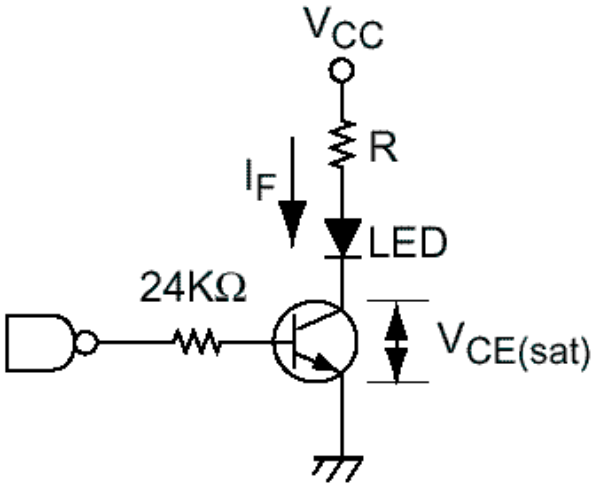
Excitación paralela



$$I_F = \frac{E - V_F}{R}$$

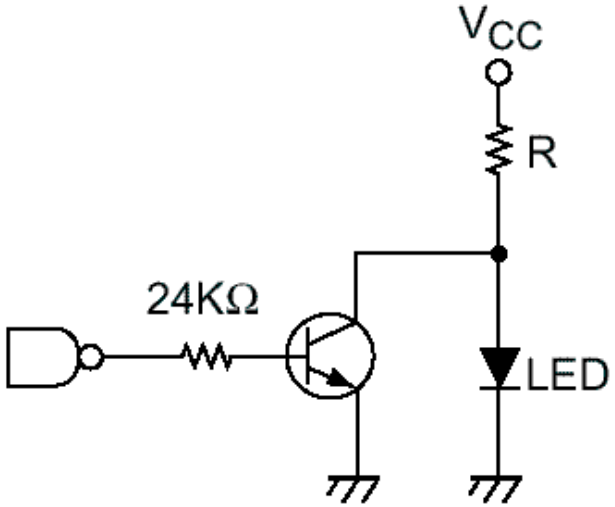
EXCITACIÓN DE LEDs EN PARALELO MEDIANTE c.c

Diodos LED (III): excitación digital



$$I_F = \frac{V_{CC} - (V_{CE(sat)} + V_F)}{R}$$

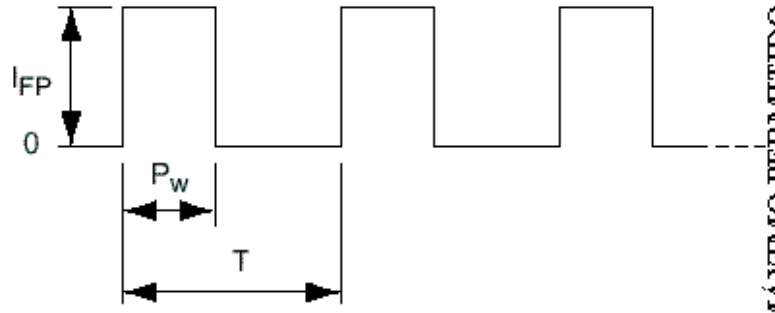
LED ACTIVADO CON LA SALIDA A NIVEL ALTO DE LA PUERTA NAND. SI LA PUERTA NAND=ON LED=ON



$$I_F = \frac{V_{CC} - V_F}{R}$$

LED ACTIVADO CON LA SALIDA A NIVEL BAJO DE LA PUERTA NAND. SI NAND=OFF, LED=ON

Diodos LED (IV): excitación PWM

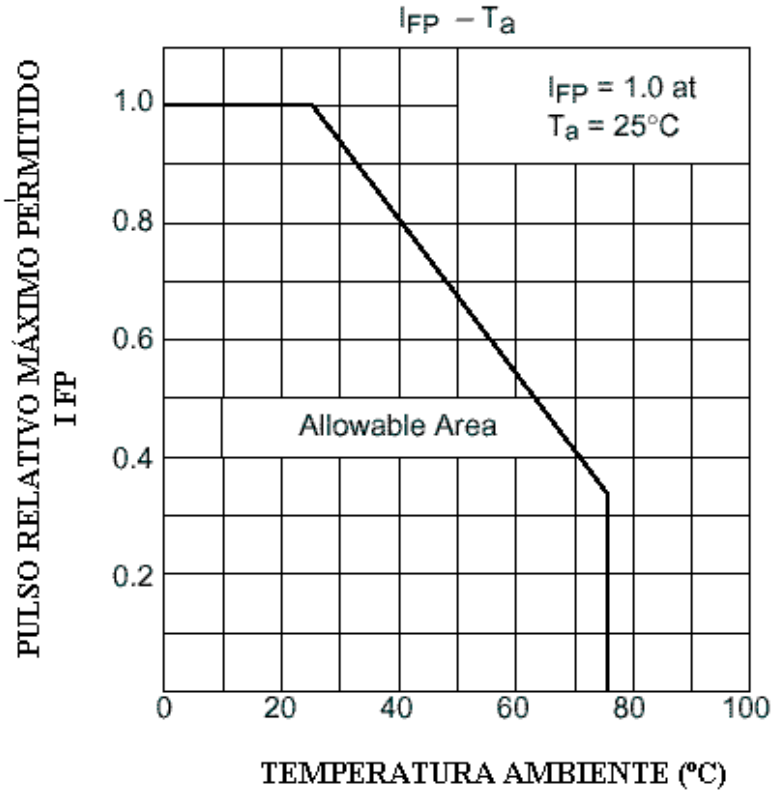


I_{FP} PULSO MÁXIMO PERMITIDO

P_W : ANCHURA DE PULSO

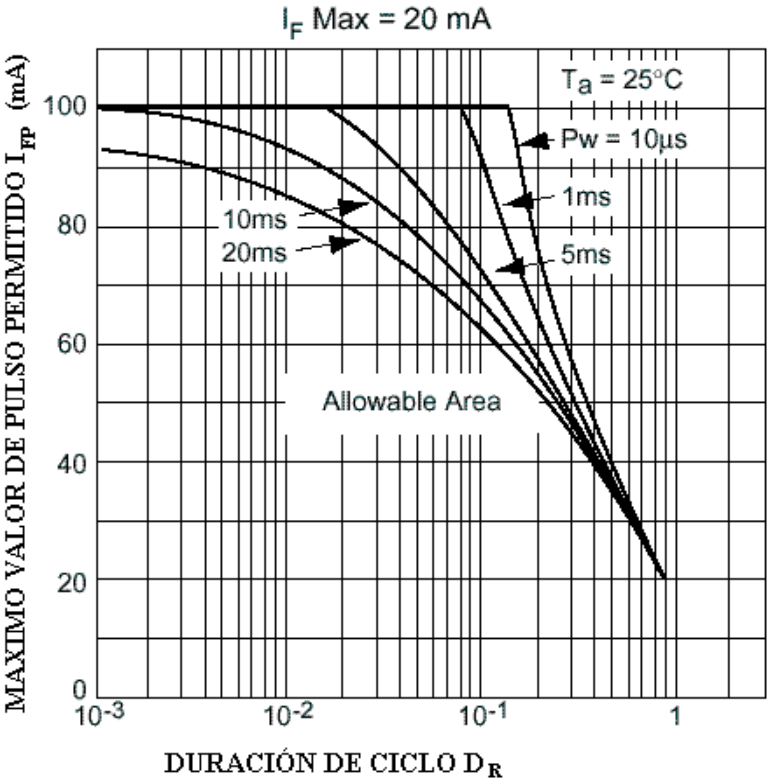
T : PERIODO DE LA SELÑAL

D_R : DURACIÓN DE CICLO $(= \frac{P_W}{T})$



INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE EL PICO DE PULSO APLICADO

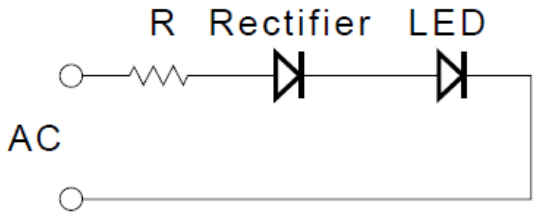
Diodos LED (V): excitación PWM



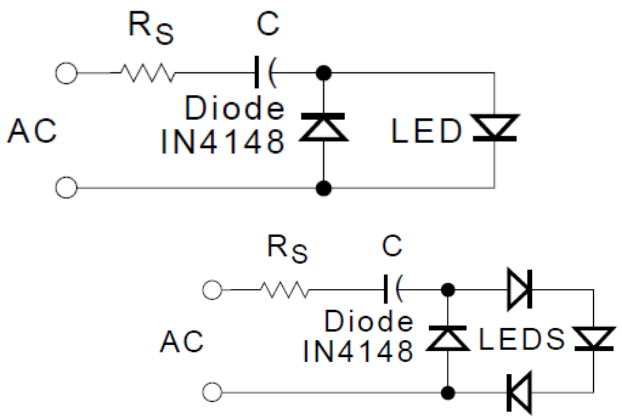
- Ventajas:
  - Permite ajuste de intensidad de forma no disipativa.
  - La corriente se mantiene constante en cada pulso, de forma que las coordenadas cromáticas se mantienen para cualquier luminosidad.

Diodos LED (VI): excitación en alterna

- Limitación por resistencia de potencia:
  - Pérdidas elevadas en R.

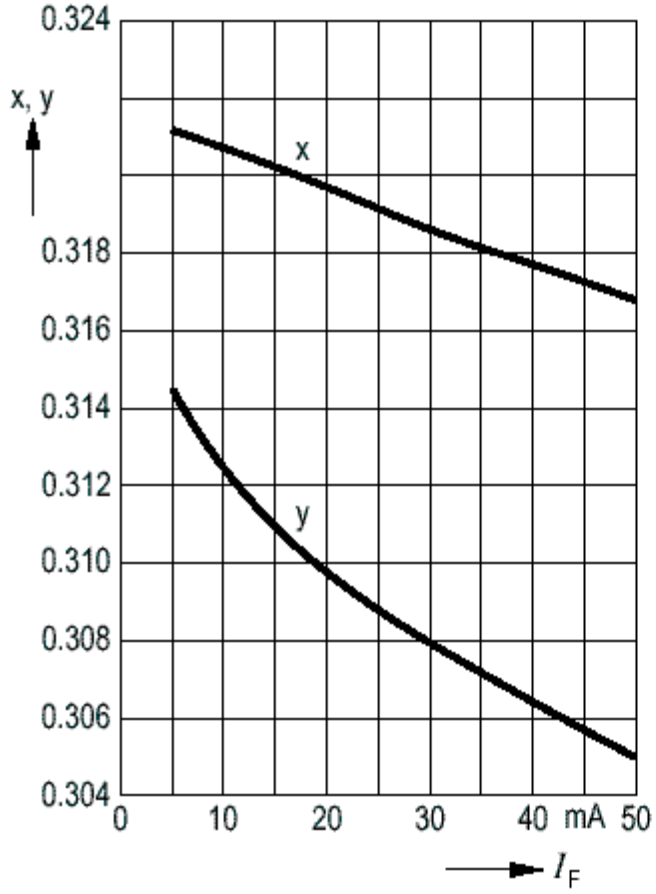


- Limitación por condensador:
  - Rs limita los transitorios en encendidos y apagados. Su valor no es crítico, 100Ω p. ej.
  - El diodo en antiparalelo absorbe el semiciclo negativo. Puede ser reemplazado por otro diodo LED. De esa forma ambos conducen alternativamente y se protegen de forma mutua.
  - C permite limitar la corriente por el diodo LED.
  - Se pueden conectar varios LEDs en serie.



$$I_{LED} \approx \frac{V_{AC}/X_c}{2} = \frac{V_{AC} \cdot \omega C}{2} = \frac{230 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot C}{2} = 36128C \Rightarrow C = \frac{I_{LED}}{36128} F$$

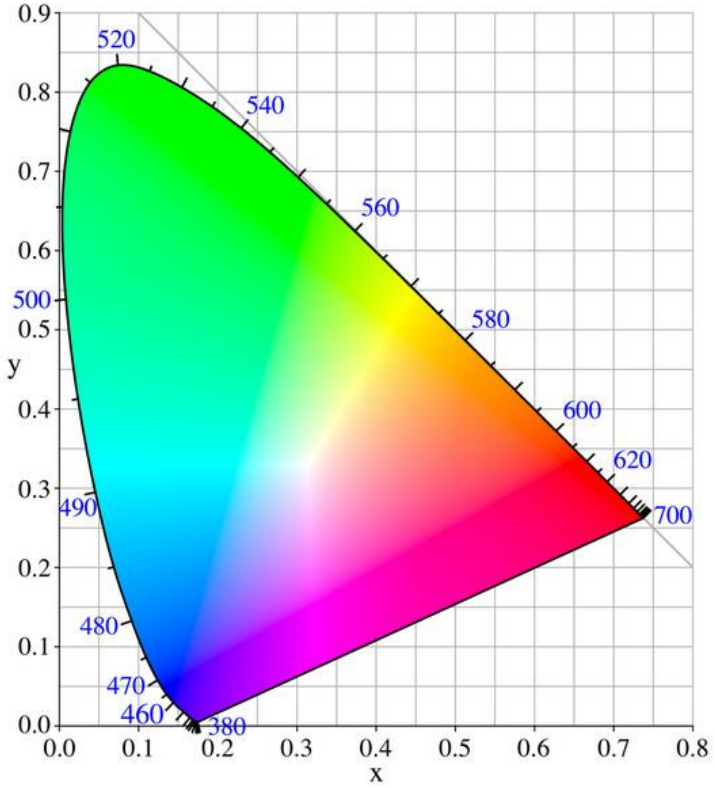
Diodos LED (VII): dependencia del color



CAMBIOS DE COORDENADAS CROMÁTICAS EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DIRECTA QUE ATRVIESA EL LED.

x, y = $f(I_F)$

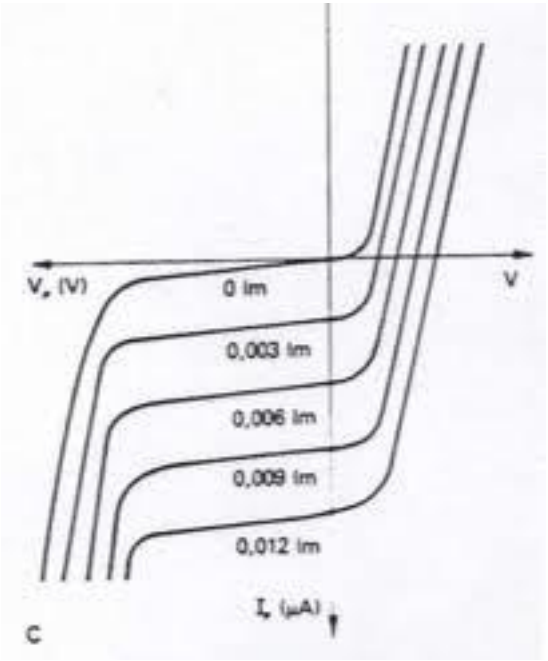
T_A = 25 °C



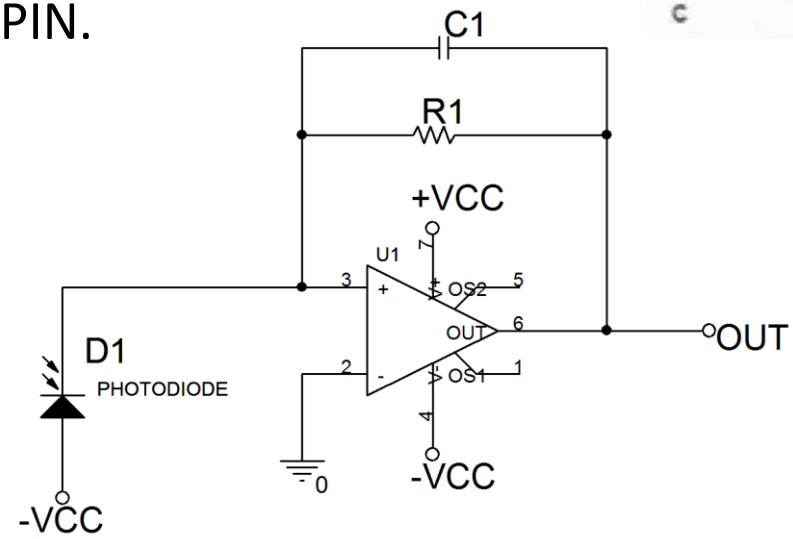
Color blanco x=0.33 y=0.33

Receptores luminosos - Fotodiodo

- Transforma la energía recibida en la formación de pares electrón – hueco.
- Los pares que provocan la conducción de corriente se generan en la zona de carga espacial.
- Para potenciar el efecto se crea una zona no dopada (I) que incrementa el tamaño de la zona de carga espacial, dando lugar al denominado fotodiodo PIN.



Curiosidad: todos los diodos son fotodiodos, pero no son tan eficientes, por el material

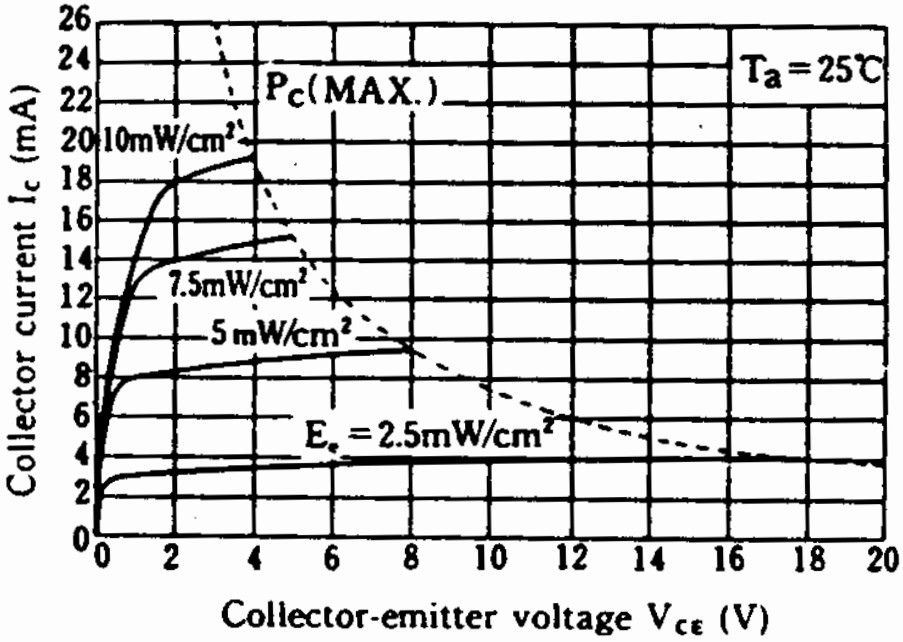


Otros receptores luminosos

Basados en el mismo principio, otros componentes modifican su estado de conducción en función de la energía luminosa incidente:

- Fotorresistores
- Fototransistores (bipolares, Darlington, FET…).
- Fototiristores
- Fototriac

Aplicación ingeniosa de un fototransistor: detector de tamaño de moneda en máquina expendedora https://www.youtube.com/shorts/Mjt4sChq7Ys

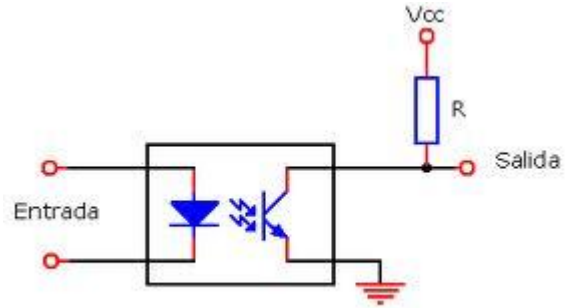


Optoacopladores (I): definición

- Se trata de dispositivos que integran los dos fenómenos descritos: son emisores y receptores luminosos.
- Transforman una señal eléctrica de entrada en luz (LED) para luego volver a transformarla en señal eléctrica (fotodiodo, fototransistor…).
- Su utilidad se encuentra en el aislamiento galvánico entre el circuito de entrada y el de salida.
- Un campo de aplicación relevante es la electrónica de potencia, pues separan la parte de potencia de la de control para proteger esta última.

Optoacopladores (II): parámetros

- Principales parámetros de funcionamiento:
  - Relación de transferencia de corriente (CTR).
  - Aislamiento entrada – salida:
    - Tensión de aislamiento.
    - Resistencia de aislamiento.
    - Capacidad de aislamiento.
  - Velocidad de respuesta: t_{pHL}, t_{pLH}.
  - Rechazo al modo común (CMR):
    - Rechazo a transitorios en modo común (CMRT).
    - Relación de rechazo al modo común (CMRR).



Circuito típico con optoacoplador

Optoacopladores (III): RTC

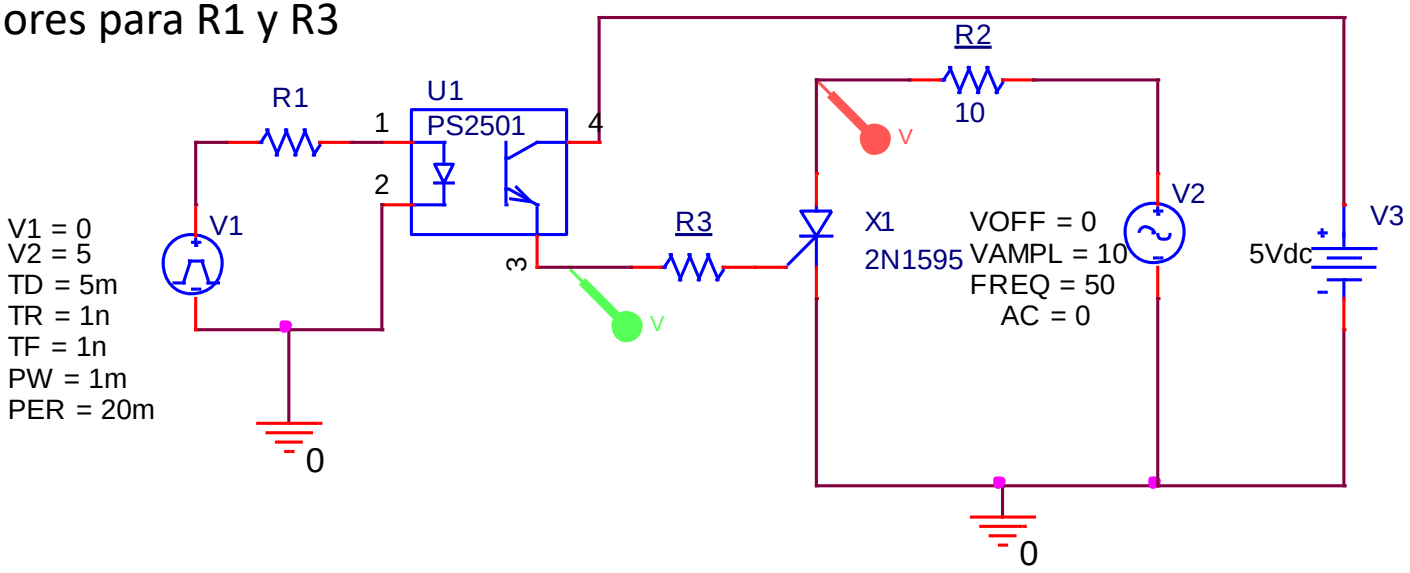
- Relación de transferencia de corriente:
  - Refleja la eficiencia del dispositivo.
  - Expresa el cociente entre un cambio de corriente en la salida y el cambio de corriente en la entrada que lo motivó.
  - Suele expresarse en %.
  - Valores típicos para un fototransistor son 10 – 50%. Para un fotodarlington puede llegar al 2000%.

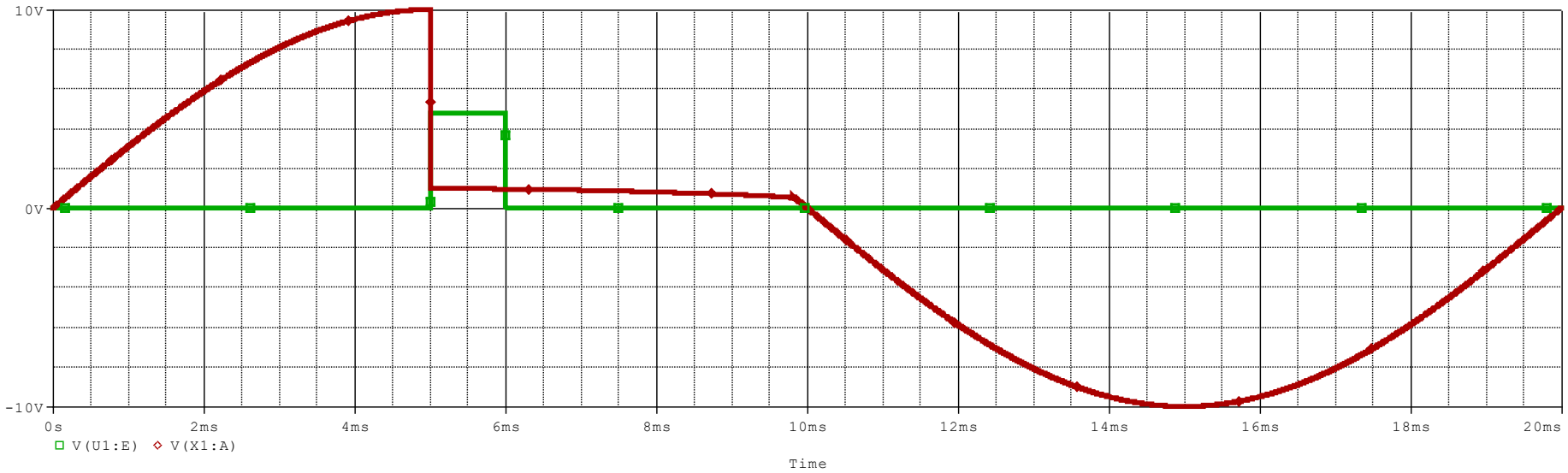
Optoacopladores (III): rechazo a transitorios

- Rechazo a transitorios en modo común:
  - Máximo gradiente de subida o bajada en la señal en modo común permitido.
  - Se expresa en V/µs.
  - Suele incluir también la máxima amplitud permitida de la señal en modo común.
  - Se aplica sobre todo a dispositivos digitales.
- Relación de rechazo en modo común:
  - Relación entre la ganancia en modo diferencial y la ganancia en modo común.
  - Se mide en (dB).
  - Se aplica sobre todo a dispositivos analógicos.

Optoacopladores (IV): Ejercicio propuesto

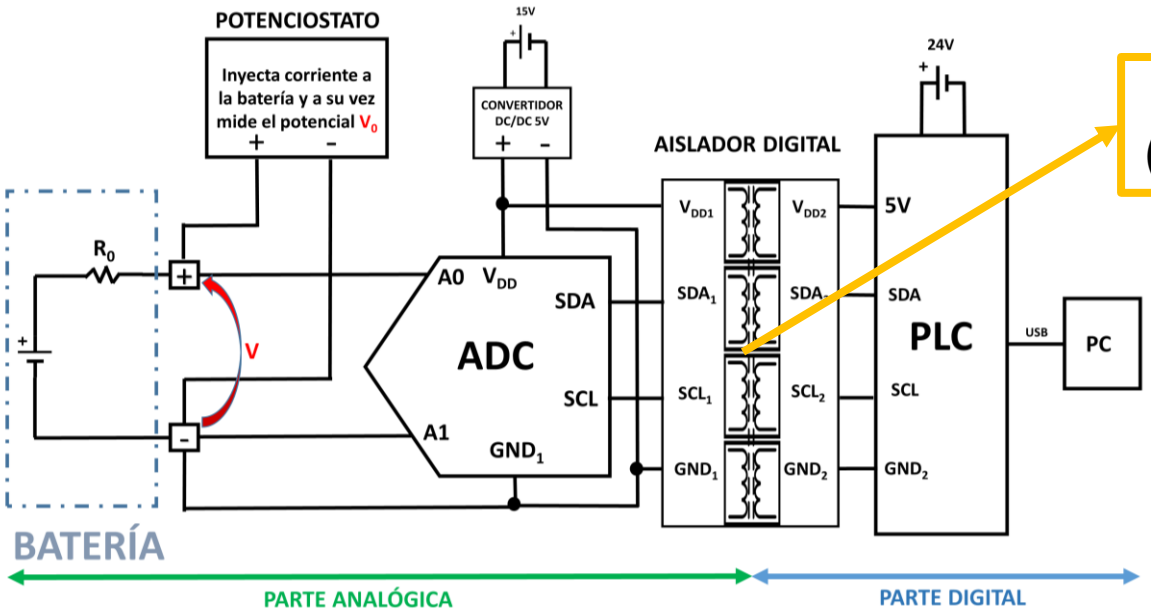
Calcular posibles valores para R1 y R3





Aisladores digitales

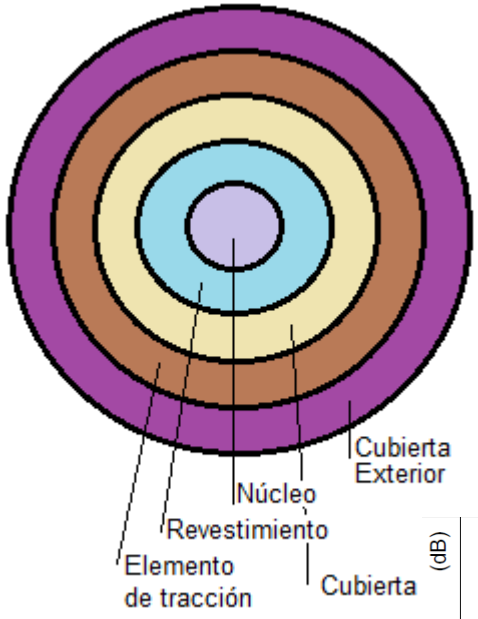
- Crítico cuando se requiere precisión en la medida, por ejemplo al emplear ADCs con comunicación I2C (precisión de microvoltios)
- Hace falta separar la parte analógica de la digital, rompiendo los bucles de tierra. Es decir, aislamiento galvánico.
- Estos dispositivos son conocidos como aisladores digitales. Los más modernos no usan optoacopladores sino tecnologías propias (basadas en elementos capacitivos o inductivos), pero la idea es similar.

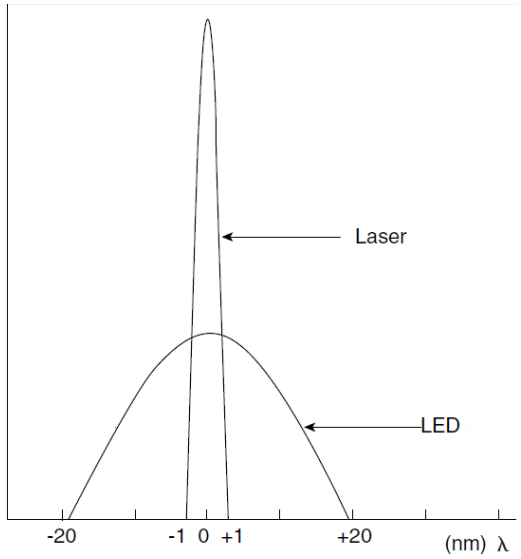


ADuM1250
(Analog Devices)

Fibra óptica (I): definición

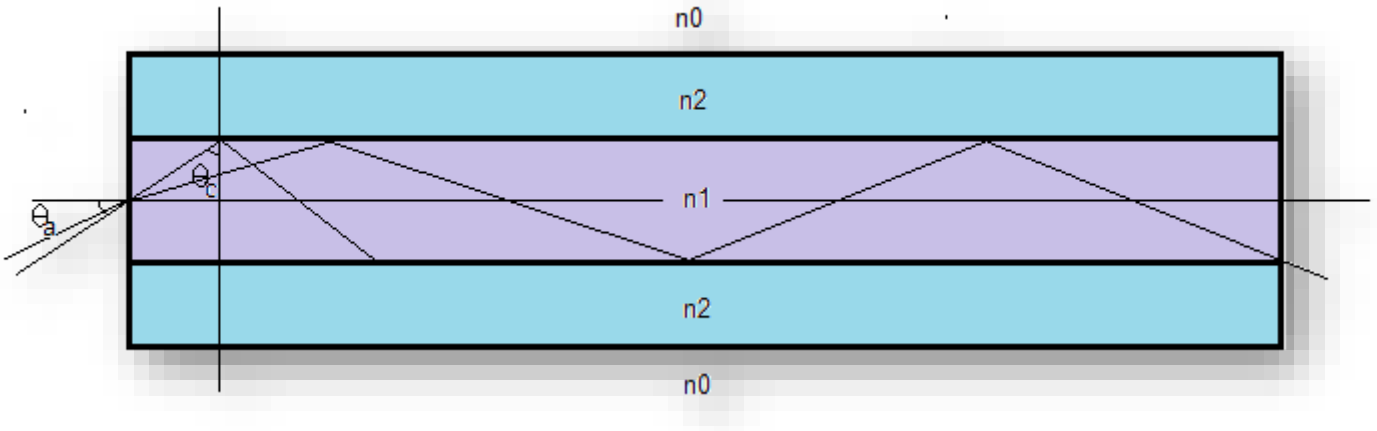
- La fibra óptica es un tipo de cable en el que los conductores son reemplazados por materiales capaces de transportar luz.
- La luz es producida por un diodo luminoso: LED o láser.
- Los cables están formados por una serie de capas que pretenden mantener y reflejar la luz en el interior.





Fibra óptica (II): propagación

- La propagación de la luz está basada en el fenómeno de reflexión total.
- Ésta ocurre cuando el ángulo de incidencia es superior al ángulo de crítico.
- $\theta_c = arcsin\left(\frac{n2}{n1}\right)$ dónde n1 >n2.



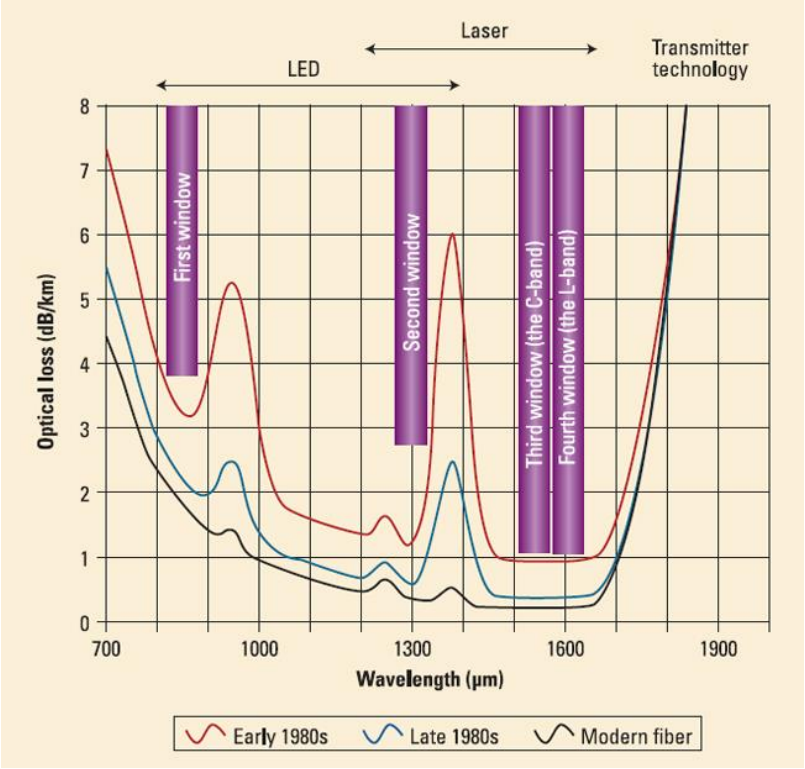
- El ángulo de aceptación es aquel por debajo del cual los rayos deben entrar en la fibra.
- Se define la apertura numérica $NA = n1 \sin\theta_a = \sqrt{(n1)^2 - (n2)^2}$ asumiendo n0 = 1 (aire).

Fibra óptica (III): atenuación

La señal óptica sufre atenuación en su recorrido por la fibra: $\alpha(dB/km) = \frac{10}{L} log \frac{P_0}{P_L}$. Esto limita la longitud del cable.

Se debe a varios fenómenos:

- Absorción del material: debida a imperfecciones e impurezas en la fibra. Aparecen ventanas ópticas: longitudes de onda a las que la absorción es menor.
- Disipación en forma de calor.
- Esparcimiento de Rayleigh: se produce por la colisión entre la luz y las moléculas de la fibra. Los rayos desviados por encima del ángulo crítico se pierden.



Fibra óptica (IV): dispersión

- Dispersión: ensanchamiento de los pulsos que limita el ancho de banda.
  - Dispersión modal: el tiempo que necesita cada rayo (modo) para recorrer la fibra es distinto ya que recorren distintos caminos.
  - Dispersión cromática: las diferentes componentes espectrales de la luz se propagan a velocidades diferentes n = n(λ).
  - El ancho de banda de la fibra: $B(GHz) = \frac{0{,}187}{\sigma_{Tot}(ns)}$ $\sigma^2{}_{Tot} = \sigma^2{}_{M} + \sigma^2{}_{C}$

Fibra óptica (V): tipos de fibras

- De acuerdo con el número de rayos (modos) que transportan, hay dos tipos de fibras:
  - Mono modo: soportan un solo modo. Tienen un núcleo estrecho de forma que solamente un rayo cumple con su restrictiva apertura numérica. Dado que no están afectadas por la dispersión modal, su ancho de banda es mayor. También su atenuación es menor.
  - Multi modo: soportan múltiples modos. Su núcleo es más grueso.
- De acuerdo con la forma de variación del índice de refracción del núcleo tenemos:
  - Salto de índice: el índice es constante y se produce una discontinuidad en la interfase con el revestimiento. Ambos tipos de fibras pueden ser de salto de índice.
  - Índice gradual: la variación se produce suavemente descendiendo del valor máximo que alcanza en el centro, hasta la interfase con el revestimiento en la que ambos índices se igualan (no hay discontinuidad). Sólo las fibras multi modo lo contemplan. Tiene la ventaja de que reduce la dispersión modal al compensar la diferente trayectoria con la velocidad de propagación. También la atenuación es ligeramente menor.

Fibra óptica (VI): fibras comerciales

- En el mercado nos encontramos con los mismos tipos de fibras:
  - Mono modo: OS1, OS2.
  - Multi modo: OM1, OM2, OM3, OM4, OM5.
- Mono modo:
  - Núcleo de 8 – 10 µm.
  - Atenuación (dB/km): OS1 (1.0), OS2 (0.4)
  - Mismo tipo de fibra: OS1 (interior), Os2 (exterior)
- Multi modo:
  - Alimentadas con LED: OM1 y OM2
  - Alimentadas con láser: OM2, OM3, OM4 y OM5
  - Núcleo de 62.5 µm: OM1
  - Núcleo de 50 µm: OM2, OM3, OM4 y OM5
  - Ancho de banda (MHz*Km): OM1 (200), OM2 (500), OM3 (1500), OM4 (3500), OM5 (3500).

Fibra óptica (VII): ejemplos

- Un valor típico para el índice de refracción del núcleo es 1,62, mientras que el del revestimiento puede ser 1,52. Para estos valores, determinar: ángulo crítico y apertura numérica.
  - $\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n2}{n1}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1{,}52}{1{,}62}\right) = 69{,}76°$
  - $NA = \sin\theta_a = \sqrt{(n1)^2 - (n2)^2} = \sqrt{1{,}62^2 - 1{,}52^2} = 0{,}56$
- Calcular el ancho de banda de una fibra multimodo con una dispersión modal de 0,3 ns/km y una dispersión cromática de 1ps/nm-km. La anchura espectral de la luz incidente es de 10nm. La longitud de la fibra es de 2km.
  - $\sigma^2{}_{Tot} = \sigma^2{}_{M} + \sigma^2{}_{C} = (0{,}3 \times 2)^2 + (0{,}001 \times 10 \times 2)^2 = 0{,}3604 \rightarrow \sigma_{Tot} = 0{,}6003\ ns$
  - $B(GHz) = \frac{0{,}187}{\sigma_{Tot}(ns)} = \frac{0{,}187}{0{,}6003} = 0{,}3115 GHz = 311{,}5 MHz$

Referencias

- **Dispositivos Optoelectrónicos.** José Ramón Sendra Sendra. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- **Componentes Optoelectrónicos**. Dpto. Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del País Vasco.
- **Electrocoupler Designer's Guide.** Avago Technologies.
- **Optical Network Design and Implementation chapter 3**. Vivek Alain. Cisco Press, 2004. Disponible en: http://media.techtarget.com/searchNetworking/downloads/FiberOptic_ch3.pdf
- **Operating LEDs on AC Power**. Appnote 6. David M. Barton. Siemens.
- How photodiodes work: https://www.youtube.com/watch?v=9b30sDb023E