

# Interfaz optomecatrónica para caracterización de respuesta angular de fotodetectores.

## Optomecatronic interface for angular response characterization of photodetectors.

Tomás Erisel Gómez Pérez (1).

Estudiante, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Tecnológico Nacional de México, Chiapas, México.  
[erisel\\_goper@hotmail.com](mailto:erisel_goper@hotmail.com).

Julio Pérez Gómez (2). Estudiante, I. T. de Tuxtla Gutiérrez. [july\\_09933@hotmail.com](mailto:july_09933@hotmail.com).

Jorge Luis Camas Anzueto (3), I. T. de Tuxtla Gutiérrez. [jcamas@ittg.edu.mx](mailto:jcamas@ittg.edu.mx).

Joaquín Domínguez Zenteno (4), I. T. de Tuxtla Gutiérrez, [quinolalo@gmail.com](mailto:quinolalo@gmail.com).

Vicente León Orozco (5), I. T. de Tuxtla Gutiérrez, [vleon@ittg.edu.mx](mailto:vleon@ittg.edu.mx).

Joel Gómez Pérez (6), I. T. de Tuxtla Gutiérrez, [jgomezp@ittg.edu.mx](mailto:jgomezp@ittg.edu.mx).

Artículo recibido en octubre 31, 2017; aceptado en diciembre 08, 2017.

### Resumen.

*Se presenta un diseño optoelectrónico para caracterizar un fotodetector, que incluye el monitoreo y atenuación de la potencia de la luz recibida por el fotodiodo sobre una posición fija en eje específico. Como fuentes de radiación se emplean 3 diferentes fotodiodos (MWWHD1, M385D1 y MCWHD2 de la compañía Thorlabs). El fotodetector utilizado fue el FDS100 de la compañía Thorlabs. El diseño incluye una interfaz de usuario para que se pueda modificar parámetros de la fuente de luz, fotodetector y del mecanismo de movimiento angular.*

**Palabras clave:** Interfaz optomecatrónica, Caracterización, programación de dispositivos optoelectrónicos.

### Abstract.

*In this work we present an optoelectronic design to characterize a photodetector, which includes monitoring and attenuation of the light received by the photodiode in a fixed position on a particular axis. As optical sources were used three different photodiodes (MWWHD1, M385D1 y MCWHD2 from Thorlabs company), and the photodiode used was the FDS100 from the same company. An user interface was included to modify parameters of the optical source, photodiode and the angular movement mechanism.*

**Keywords:** Optomecatronic interface, Characterization, Programming of optoelectronic device.

## 1. Introducción.

Los fotodetectores pueden ser clasificados en dos categorías detectores térmicos y detectores cuánticos. La fotocorriente generada por un fotodetector es dependiente del ángulo de incidencia de la fuente de iluminación. Conocer éste intervalo es de vital importancia en el diseño de aplicaciones que contemple dispositivos optoelectrónicos como lo es el fotodetector. Los antecedentes relacionados con la medición de la respuesta angular de un fotodetector han sido estudiados con diferentes formas de caracterización utilizando radiometría y fotometría.

La irradiancia global y difusa y la iluminancia se miden con instrumentos que se supone que tienen verdaderas respuestas de coseno. Se han reportado mediciones de las respuestas de coseno para varios instrumentos comerciales y sobre la respuesta coseno de un radiómetro de banda de sombra giratoria multi-filtro. Las mediciones se realizaron con un banco de pruebas de respuesta coseno automatizado utilizando el mismo protocolo para cada instrumento. El banco de coseno mide con resolución angular variable tan fina como  $0.25^\circ$ . La rotación automática está en un plano. Una rotación manual permite mediciones en otros azimut (Michalsky et al., 1995). Un radiómetro multi-filtro de banda de sombra giratoria es un instrumento basado en tierra que utiliza detectores de fotodiodos de interferencia-filtro independientes y la técnica de banda de sombra rotativa automática para realizar mediciones espectralmente resueltas en siete bandas de longitud de onda (elegidas en el momento de la fabricación entre 350 nm y  $1.7\ \mu\text{m}$ ) de irradiancia directa-normal, total-horizontal y difusa-horizontal. Este instrumento consigue una precisión en la irradiación espectral directo-normal comparable con el de los radiómetros de seguimiento y es más preciso que los instrumentos convencionales para la determinación de las irradiaciones espectrales difusas y horizontales totales debido a que la función de aceptación angular del instrumento se aproxima estrechamente al ideal Coseno, y porque el componente medido directo-normal puede ser corregido para el error de aceptación angular restante (Harrison et al., 1994). Mediante el uso de simulaciones de Monte Carlo, se ha investigado la energía y la dependencia angular de la respuesta de los detectores de centelleo plásticos (DCP) en haces de fotones. Para la dependencia energética, la respuesta de los detectores se calcula como la cantidad del detector por unidad de dosis de agua. La perturbación causada por el vástago de fibra óptica conectado al DCP para guiar la luz óptica a un fotodetector se estudió en simulaciones utilizando diferentes materiales de fibra óptica (Lilie et al., 2010). El estudio de la respuesta angular se propone con el fin de reducir la corriente suministrada por una luminancia en píxeles de la escena y debe conocer también en sentido estricto la superficie reflexiva de este píxel, su respuesta espectral (forma y valor de pico) y su respuesta angular (para decir el cambio en su respuesta como una función del ángulo de incidencia del flujo luminoso) (Rouzo, 2007). La comprensión de la respuesta angular de los fotodetectores es crucial para mejorar la extracción de la luz. Pérdidas inducidas por las reflexiones de Fresnel en un Fotomultiplicador de Silicio resulta en una dependencia angular de la superficie detectada Señal en la luz incidente. Se ha construido un banco de pruebas dedicado al centro europeo de investigación nuclear tras haber realizado un estudio sistemático de muestras de diversas especificaciones y los fabricantes (Nemallapudi et al., 2013). Se ha estudiado el efecto de la respuesta angular de fotodiodo en la medición de la resonancia de plasmón de superficie (RPS) en películas finas metálicas usando la configuración de Kretschmann-Raether. La señal del fotodiodo depende no sólo de la intensidad de la luz sino también del ángulo de incidencia. Esto implica que la sensibilidad del fotodiodo cambia a lo largo de la curva RPS. En consecuencia, el espectro RPS medido se distorsiona, afectando así a los ajustes y análisis numéricos de las curvas RPS. Se ha analizado la magnitud de este cambio, determinado cuándo es significativo y desarrollado un método de calibración de la configuración experimental que corrige este tipo de distorsiones de la forma espectral (Galvez et al., 2012). En este artículo se presentan resultados de un fotodiodo como función de la posición angular de una fuente de luz en particular. Se describe la programación que engloba la manipulación del movimiento angular como mínimo  $0.1$  grados, la variación de la corriente que circula por la fuente de luz para variar la intensidad recibida por el fotodetector y la obtención de la fotocorriente generada y su almacenamiento para la obtención de la gráfica de interés.

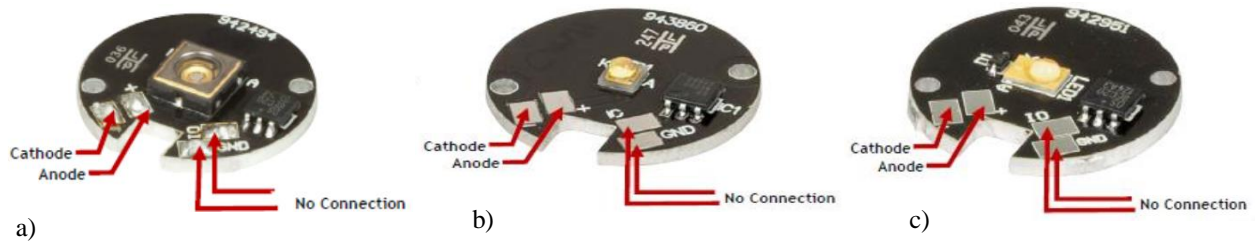
## 2. Métodos.

La metodología que se llevó a cabo en el proceso de la caracterización de la respuesta angular de fotodetectores fue la de realizar un diseño de mecanismo que incorporó a la fuente de luz que se va a utilizar en la caracterización. Este mecanismo está diseñado de tal forma que se pueda intercambiar la fuente de luz. Considerando que existen led's de diferente tamaño, es necesario diseñar un mecanismo escalable acorde a los tamaños comerciales de optoelectrónica. El movimiento angular se encuentra incorporado a un sistema de movimiento proporcionado por un sistema de control. Este movimiento es proporcionado por un motor a paso con un movimiento que permitió obtener un grado de resolución. Es necesario saber que los led's a utilizar deben ser de compañías reconocidas para que la variación de la cantidad de energía en función al tiempo permanezca constante asumiendo que la corriente eléctrica que circula por él sea constante. Estos led's fueron adquiridos en la compañía Thorlabs ya que permite cubrir un ancho espectral acorde al espectro de detección del fotodetector. Las fuentes de luz a considerar pueden ser led's, laser, lámparas de halógeno, deuterio, xenón ya que cada uno presenta diseños diferentes. La fuente de luz necesita de una fuente de

corriente constante que debe ser variable ya que cada una de las fuentes de luz presenta diferentes corrientes de operación.

El siguiente paso fue diseñar una base donde va incluido el fotodetector y que debe estar integrado al mecanismo de desplazamiento angular, trazando un eje de movimiento tomado desde el centro del fotodetector. El fotodetector debe estar integrado electrónicamente a un amplificador de transimpedancia para que se amplifique la fotocorriente y sea procesada.

Una vez obtenido el sistema optométrico es necesario diseñar una interfaz de usuario donde se le introduzca los parámetros del fotodetector a caracterizar y de la fuente de luz de iluminación, ya que cada fuente de luz tiene características propias de diseño y que cambia en función al modelo. Para ello es necesario conocer con qué tipo de fuente de luz fue caracterizado el fotodetector. En la figura 1 se presenta un esquema de cómo se encuentra ubicado el fotodetector con respecto a la fuente de luz a utilizar, la cual, inicia en una posición angular de cero grados y termina hasta los 180 grados. En la figura 1 se presenta las fuentes de luz que se encuentran disponibles para llevar a cabo la caracterización del fotodetector. Estas fuentes de luz son diodos emisores de luz de alta estabilidad temporal y que necesitan un disipador de calor para no sobre calentar el dispositivo. Cada uno de estos, tiene diferente espectro de luz y se seleccionará acorde al fotodetector a utilizar. Estos LEDs se encuentran en una placa de circuito impreso de núcleo metálico (MCPCB) y son diseñado para proporcionar potencia de luz alta en un paquete compacto y tiene una temperatura de color correlacionada promedio de 5000 K. La potencia mínima típica emitida de cada uno es de 270, 840 y 500 mW. En la figura 2 presenta el diagrama electrónico para conectar estos leds. El dispositivo que hace que se re programe el voltaje de alimentación es el LM317 junto con el potenciómetro de 10 kΩ. Además cuenta con un sistema de sobreprotección para que el voltaje no se exceda de lo proporcionado por el usuario. En la figura 3 se observa en tiempo real el monitoreo del punto de operación seleccionado por el usuario de voltaje y corriente que alimentan al LED. Todo el sistema debe estar retroalimentado con la interfaz de usuario, ya que ahí va aparecer el resultado final de la caracterización. Una vez integrada todo el sistema a la interfaz de usuario se procederá caracterizar cada uno de los fotodetectores obteniendo como resultado una gráfica en la interfaz de usuario donde se presente la respuesta angular del fotodetector. Esta gráfica presentará intensidad en función al ángulo de incidencia.



**Figura 1.** Las fuentes de luz utilizadas de la compañía thorlabs: a) MCPCB-Mounted LED, 385 nm (M385D1), b) MCPCB-Mounted LED, 6500 K (MCWHD2), c), MCPCB-Mounted LED, 3000 K (MWWHD1).

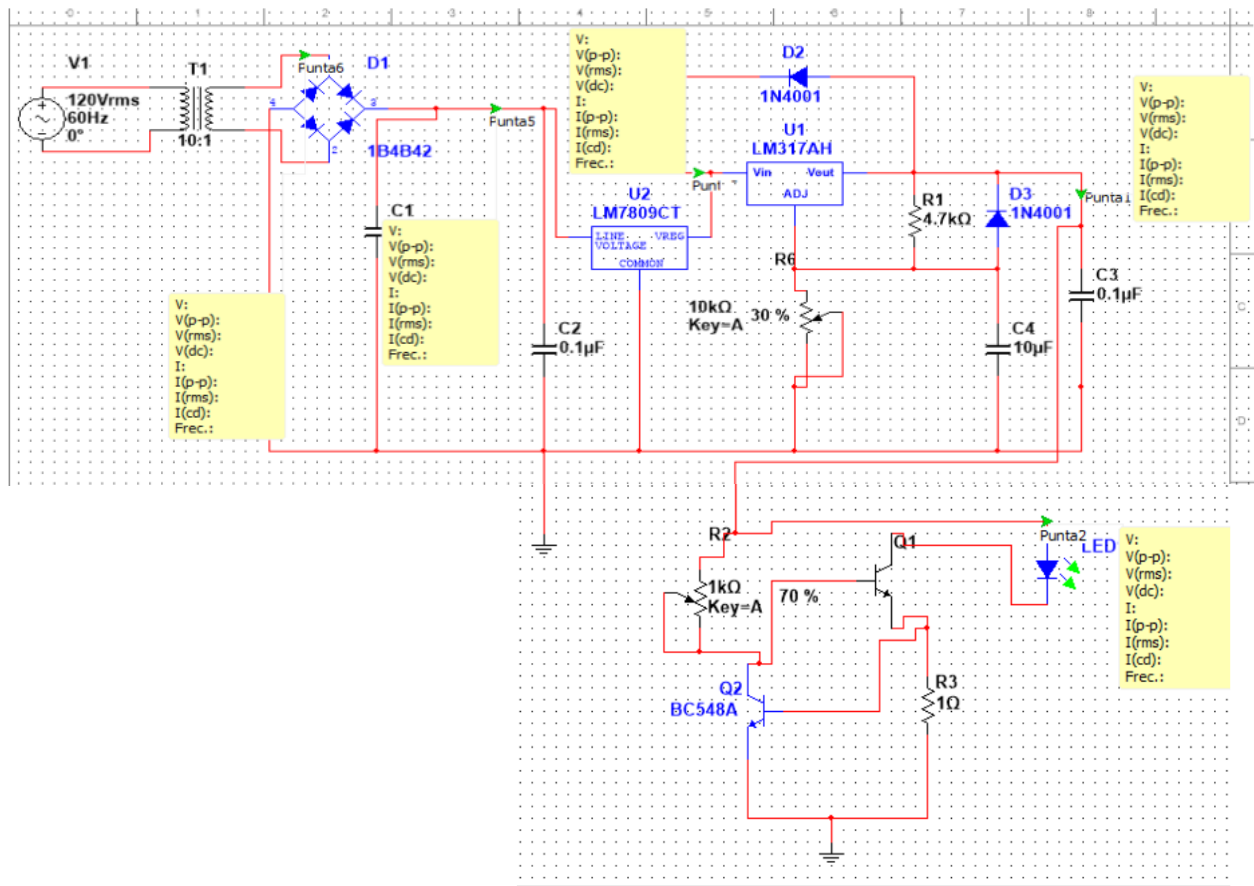


Figura 2. Diagrama electrónico de la fuente de luz con sistema de protección.



Figura 3. Monitoreo del voltaje y corriente que circula por el led.

En el algoritmo 1 se presenta la programación de los motores a pasos para que éste gire de 0 a 180 grados. En este algoritmo es posible reprogramar la resolución del movimiento angular de la fuente de luz respecto al fotodetector, así también el tiempo que tarda en realizar todo el recorrido. El fotodetector captura la intensidad de la luz proveniente de la fuente de luz y ésta es almacenada en una base de datos. El número de datos almacenados también puede ser reprogramada para ajustes y calibración del sistema.

**Algoritmo 1.** Movimiento de mecanismo optomecánico resumido.

```

// sistema automático del movimiento hacia adelante y hacia atrás de un motor paso a paso
int push = 0;
int entrada = 2;
int pulsador1 = 0;
int entrada1 = 3;
int p1;
int p2;

int motorPin1 = 8;
int motorPin2 = 9; // Pines del Arduino al integrado
int motorPin3 = 10;
int motorPin4 = 11;
int delayTime = 10000; // DelayTime determina la espera entre uno y otro paso
int delayTime1 = 20; // en 1800 =30 minut // DelayTime1 determina la velocidad de giro
entre un paso y otro
int delayTime2 = 10; // tiempo de retroceso el motor
int count = 0;
void setup()
{
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(motorPin1, OUTPUT); // Configuración de los pines como salida digital
  : ...
  ...
  //if (push == HIGH)
  for (count = 0; count < 250; count++) /* (variable)en donde podemos modificar la cantidad
de pulsos que se desean asignar al motor,
para variar la cantidad de giros o fraccion de giro en un sentido.
(50 pulsos para 360°)(25 pulsos para 180°)(10 pulsos
para 72°) ETC.....*/

{
  // Punto A (Primero)
  digitalWrite(11, LOW);
  digitalWrite(10, LOW);
  digitalWrite(9, HIGH);
  digitalWrite(8, HIGH);
  delay(delayTime1); //Tiempo entre pulsos

  // Punto B (Segundo)
  digitalWrite(11, LOW);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(9, HIGH);
  digitalWrite(8, LOW);
  delay(delayTime1);
  ...
  ...
  ...
  // Punto C (Tercero)
  for (count = 0; count < 250; count++) /* (variable)en donde podemos modificar la

```

*cantidad de pulsos que se desean asignar al motor,  
para variar la cantidad de giros o fraccion de giro en sentido  
contrario. (50 pulsos para 360°)(25 pulsos para 180°)(10  
pulsos para 72°) ETC.....\*/*

```
// Punto D (Cuarto)
{
...
...
}}}}
```

---

### 3. Resultados

En la caracterización de la dependencia de la intensidad que recibe el fotodetector en función al movimiento angular de una fuente de luz, se encontró que el número de datos obtenidos en el tiempo que tarda en moverse la fuente de luz desde cero grados hasta 180 grados cambiaba y distorsionaba las gráficas obtenidas al final de la caracterización.

Un receptor óptico convierte la señal óptica proveniente de la fibra óptica en la señal eléctrica y recupera los datos transmitidos. Su elemento de entrada es el fotodetector, que convierte la luz en corriente eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico. Los receptores ópticos, en general, deben tener alta sensibilidad, respuesta rápida, bajos niveles de ruido, bajo costo y una alta confiabilidad. En el caso de sistemas de fibra óptica. El área fotosensible del fotodetector debe ser comparable con el núcleo de una fibra. Los requisitos antes mencionados son satisfechos de una mejor manera por detectores fabricados con base en materiales semiconductores.

El ancho de banda de un fotodetector está determinado por la velocidad con la cual éste responde a las variaciones de la potencia óptica incidente. El tiempo de subida se define como el lapso que la corriente tarda para pasar del 10 al 90% de su valor final cuando la potencia óptica incidente cambia abruptamente en forma de escalón.

Evidentemente, la transmisión T dependerá del tiempo que le tome a los electrones y los huecos viajar a los contactos electrónicos. También depende del tiempo de respuesta del circuito eléctrico utilizado para procesar la fotocorriente.

Para esta etapa del diseño del circuito fotodetector se empleó un fotodiodo PIN, porque se necesita un fotodiodo que tenga tiempos de transmisión muy cortos (tiempo de encendido o subida y tiempo de apagado o bajada), además que no presente mucho ruido. El circuito fotodetector debe ser capaz de tomar una lectura del funcionamiento del LED, mostrando la señal en forma óptica en una señal de forma eléctrica, por lo que debe de presentar ciertos componentes electrónicos para convertir la corriente generada por el fotodiodo al incidirle cierta cantidad de luz en un nivel de voltaje que sea capaz de ser medido. Para este caso el fotodiodo que se va a utilizar es el fotodiodo PIN FDS100, que es un diodo de silicio de alta velocidad y un área activa grande con una respuesta espectral que va de los 350 nanómetros hasta los 1100 nanómetro, es decir, abarca el espectro de luz visible hasta el infrarrojo.

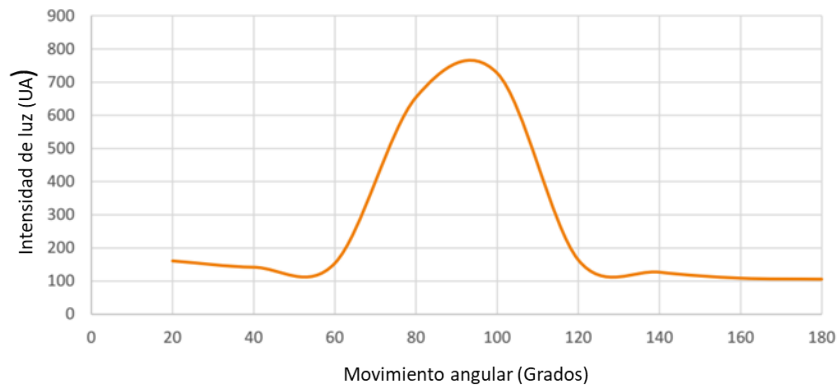
El diseño del circuito simple con el fotodiodo FDS100 fue un diseño que solamente se utiliza para el fotodiodo con una resistencia para convertir la corriente producida por el mismo en un nivel de voltaje, para esto la resistencia debe de ser lo suficiente elevada (se utilizó el valor de 1Mohms) para convertir la pequeña corriente que genera el fotodiodo que está en el orden de los nano Amperes (nA). También se le agregó un filtro pasa bajas para reducir la cantidad de ruido que pueda generar la fuente de alimentación, que en este caso se le suministra al circuito un voltaje de 5V.

En la Figura 4 se presenta una gráfica, donde se llevó a cabo con las luces apagadas con 25 datos de adquisición, cada uno con 7.2 grados de desplazamiento. En el cual podemos observar que entre menor datos capturados y con la luz apagada el comportamiento. El comportamiento tiende a estabilizarse sin embargo, no es posible utilizarla, ya que presenta variaciones que sobrepasan la relación señal a ruido permitido por el código digital.



**Figura 4.** Caracterización angular con variaciones.

En la figura 5 se presenta una gráfica mejorada con la luz apagada y con 10 datos capturados con 20 grados de desplazamiento. En este caso se observa una gráfica con un contorno estable en función al movimiento angular de la fuente.



**Figura 5.** Caracterización angular sin variaciones.

Con todos estos elementos que se analizaron fue posible realizar la medición de los tiempos de la respuesta de dispositivos emisores de luz, mediante el proceso de conversión eléctrica a óptica y viceversa. El proceso de medición de tiempos de respuesta debe de seguir una serie de etapas que son indispensables para tener la capacidad de aislar los diversos resultados que se obtengan en tales etapas, para así llegar a una conclusión acerca de lo medido.

### Conclusiones.

La respuesta espectral medida con iluminación continua presenta un máximo de responsividad que se desplaza hacia longitudes de onda más cortas. También es muy importante considerar el tipo de unión p-n y p-i-n. Se observó que cuantos más datos de adquisición de la señal proveniente del fotodiodo incrementaba el ruido. Esto debido a la alta sensibilidad del fotodiodo, por lo que se realizó caracterización en función al número de datos obtenidos. Es parte fundamental que el desplazamiento cuente con resolución de movimiento angular variable, debido a que los fotodetectores no presentan las mismas características de operación.

### Créditos.

Al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por financiamiento parcial de este proyecto, con número SII-2017-2.

### Referencias Bibliográficas.

- Galvez, F.,** Monton, C., Serrano, A., Valmianski, I., de la Venta, J., Ivan K. Schuller, and Garcia M.A. (2012). *Effect of photodiode angular response on surface plasmon measurements in the Kretschmann-Raether configuration*, Review of scientific instruments, 83, 093102.
- Harrison, L.,** Michalsky, J., and Berndt, J. (1994). *Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: An instrument for optical depth and radiation measurements*, Applied Optics 33, 5118-5125.
- Judikaël Le Rouzo.** (2007). *Study of the angular and spectral response of infrared photodetectors*, Thèse soutenue le 29 novembre 2007.
- Lilie L. W.** Wang, David Klein, and A. Sam Beddara. (2010). *Monte Carlo study of the energy and angular dependence of the response of plastic scintillation detectors in photon beams*, Med. Phys. 37 (10).
- Michalsky, J.,** Harrison, L.C., and Berkheiser, W.E. (1995). *Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors*, Solar Energy, 54, 6, 397-402.
- Nemallapudi, M.V.,** Gundacker, S., Knapitsch, A., Lecoq, P., Liu, Z. and Auffray, E. (2013). *Si PM Angular Response and Enhanced Light Extraction*, Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2013 IEEE.

### Información de los autores.



**Tomás Erisel Gómez Pérez,** Graduado de la Carrera en Ingeniería Electrónica 2017, la residencia profesional la desarrolló en el laboratorio de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en la línea de Investigación Sistemas Optomecatrónicos del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Su área de interés es electrónica, mecatrónica, optoelectrónica.



**Julio Pérez Gómez,** Graduado de la Carrera en Ingeniería Electrónica 2017, la residencia profesional la desarrolló en el laboratorio de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en la línea de Investigación Sistemas Optomecatrónicos del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Técnico en Mantenimiento de Equipo y Sistemas. Su área de interés es electrónica, mecatrónica, optoelectrónica.





**Jorge Luis Camas Anzueto** es graduado como Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, graduado como Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias con la Especialidad en Óptica y subespecialidad Optoelectrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, miembro honorífico del Sistema Estatal de Investigadores. Actualmente docente-investigador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería y de la carrera Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Su área de interés es sensores ópticos, sensores de fibra óptica, optoelectrónica y optomecatrónica.



**Joaquín Eduardo Domínguez Zenteno**, es Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Toluca, Ingeniero en Electrónica con especialidad en Instrumentación y Control por el Instituto Tecnológico de Nuevo León, en Cd. de Guadalupe, Nuevo León. Es profesor de tiempo completo en el área de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y Jefe de Proyectos de Vinculación de Ingeniería Electrónica. Es investigador desde 2009 y colabora en la línea de investigación de “Instrumentación” de Ingeniería Electrónica.



**Vicente León Orozco**, es graduado como Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Diplomado en Telecomunicaciones por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Toluca. Actualmente presidente de la Academia de Electrónica y Docente de la carrera en Ingeniería Electrónica. Su área de interés es desarrollo de sistemas optoelectrónicos, sistemas de comunicaciones y fibras ópticas.



**Joel Gómez Pérez**, es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2005 y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2013. Ha colaborado con la Universidad Politécnica de Chiapas en el área de Ingeniería Mecatrónica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto

Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2010 y colaborador de la Universidad del Valle de México desde 2013. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores desde 2011.