

## Implementación digital de filtros FIR para la minimización del ruido óptico y optoelectrónico de un sistema de barrido óptico

Jesús E. Miranda-Vega<sup>a,\*</sup>, Moisés Rivas-López<sup>a</sup>, Wendy Flores-Fuentes<sup>b</sup>, Oleg Sergiyenko<sup>a</sup>,  
Lars Lindner<sup>a</sup>, Julio C. Rodríguez-Quiñonez<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería (Campus Mexicali), Blvd. Benito Juárez S/N, Parcela 44, 21280 Mexicali, BC, México.

<sup>b</sup> Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería (Campus Mexicali), Blvd. Benito Juárez S/N, Parcela 44, 21280 Mexicali, BC, México.

### Resumen

Existen distintos dispositivos capaces de discriminar el ruido óptico y optoelectrónico, sin embargo, el costo de su implementación y mantenimiento resulta costoso. Este trabajo examina la posibilidad de integrar digitalmente filtros de respuesta finita al impulso (en inglés, FIR; Finite Impulse Response) al transductor de un sistema OSS para obtener un mejor rendimiento en un ambiente real de operación. En este trabajo se propone la evaluación de la implementación de distintos filtros FIR en diferentes transductores fotosensores como lo son el resistor dependiente de luz (en inglés, LDR; Light-Dependent Resistor) y el diodo emisor de luz (en inglés, LED; Light-Emitting Diode).

#### Palabras Clave:

Análisis y tratamiento de señales; Sensores e instrumentos virtuales; Ruido; Modulación; Visión 3D y estéreo.

### Digital Implementation of FIR Filters for the Minimize of Optical and Optoelectronic Noise of an Optical Scanning System.

#### Abstract

There are different devices capable of discriminating optical and optoelectronic noise, however, the cost of its implementation and maintenance is expensive. This paper examines the possibility of digitally integrating Finite Impulse Response (FIR) filters into the transducer of an OSS systems to obtain better performance in a real operating environment. In this paper we propose the evaluation of the implementation of different FIR filters in different photo-sensors transducers, such as the Light-Dependent Resistor (LDR) and the Light Emitting Diode (LED).

#### Keywords:

Analysis and treatment of signal, Sensors and virtual instruments, Noise, Modulation, 3D stereo vision.

### 1. Introducción

Hoy en día las herramientas computacionales y de control representan campos para el desarrollo de aplicaciones de visión artificial (Steger, Ulrich, & Wiedemann, 2018). Los sistemas de visión artificial se utilizan para la inspección automática y localización de personas y objetos (Sergiyenko & Rodríguez-Quiñonez, 2016), (Pollard & Gingras, 2012). Los campos interdisciplinarios mencionados anteriormente convergen en un mismo objetivo que es localizar un objeto en el espacio o coordenada espacial. Los sistemas de visión

artificial se auxilian de dispositivos optoelectrónicos y fuentes de luz de tipo coherente o incoherente (Shan & Toth, 2018). En el caso de aplicaciones donde se requiera de métodos de localización de vehículos, estos utilizan el sistema de posicionamiento global GPS (en inglés, GPS; Global Positioning System) para ubicar la posición del vehículo mediante la triangulación de la información capturada por medio de varios satélites (Fridman, Weber, Greenstadt, & Kam, 2017).

\*Autor para la correspondencia: elias.miranda@uabc.edu.mx

Este trabajo está enfocado principalmente en los sistemas de barrido ópticos (en inglés, OSS; Optical Scanning System), cuyas aplicaciones emplean fotosensores y fuentes de luz para la localización de coordenadas, la medición de distancias y ángulos entre un objeto y el sistema OSS.

La novedad de este trabajo radica en la implementación digital de filtros FIR para el procesamiento de la señal analógica capturada de distintos fotosensores utilizados en un OSS. Dado que en previos trabajos ya publicados (Rivera-Castillo et al., 2017) el rendimiento del sistema OSS en un ambiente real de operación fue nulo. Es decir, no se pudo capturar la señal correspondiente al barrido de un punto de referencia dado. Esto debido a que en un ambiente real el sistema OSS está expuesto a fuentes de radiación que saturan el transductor original de nuestro sistema OSS, un fotodiodo.

Para solucionar el problema anterior existen distintos métodos para filtrar la interferencia de la luz solar.

Uno de estos métodos consiste en la utilización de filtros ópticos como lo son los filtros polarizadores, filtros de color y filtros de densidad neutra. Cuando son utilizados estos filtros ópticos parte del espectro de la señal de referencia también es atenuado en conjunto con la luz solar, lo cual limita el alcance del sistema OSS para realizar lecturas a largas distancias. Además otra desventaja de estos filtros es su alto costo.

Otra de las opciones para solucionar el problema de interferencia de la luz solar es usar una fuente de luz pulsada. Aunque la problemática que se presenta en la utilización de la luz pulsada es encontrar una fuente de luz incoherente que sea capaz de conmutar a altas frecuencias. Otra desventaja de emplear luz pulsada para el sistema OSS propuesto, es el no poder cumplir con el teorema de Nyquist-Shannon, es decir que la frecuencia de barrido del sistema OSS debe de ser por lo menos 2 veces más alta a la frecuencia de la señal pulsada. El principio de operación del sistema OSS propuesto, radica en que internamente este está compuesto por un espejo que gira a una velocidad constante, que direcciona la luz al transductor.

El sistema OSS actúa como un sistema de adquisición que realiza mediciones de la señal que le proporciona el transductor en forma de muestras, dado que durante un intervalo de tiempo el transductor captura la señal de la fuente de referencia y en otro intervalo de tiempo no hay señal que pueda capturar del transductor, lo cual hace imposible que el sistema OSS cumpla con el teorema de Nyquist-Shannon.

Por otro lado, el sistema OSS se compone de un motor DC que trabaja a 4800 revoluciones por minuto lo que es equivalente a 80 revoluciones por segundo, a esto se le conoce como la frecuencia máxima que el sistema podría muestrear. Por esta razón el sistema se limita de emplear señales pulsadas que no cumplan con el teorema de muestreo.

En el caso de un control remoto se utilizan señales pulsadas de aproximadamente 30 kHz a 40 kHz para discriminar interferencias del medio, sin embargo, el sensor que captura la señal pulsada es estático y el sistema OSS presentado en este trabajo es dinámico.

Una de las propuestas para solucionar la problemática del ruido óptico es utilizar como fotosensor un LED de color azul, esto dado a las características que este presenta.

El LED estará actuando como un filtro optoelectrónico, ya que este dispositivo semiconductor es menos sensible a la radiación solar, ya que las frecuencias de onda corta son atenuadas por la capa de ozono.

Por otro lado, la señal capturada por el LED azul como fotosensor no es suficiente, la señal capturada por este dispositivo requiere una etapa de acondicionamiento ya que posteriormente un sistema de adquisición de datos (en inglés, DAQ; Data Acquisition) procese dicha señal y así sean implementadas herramientas digitales para suavizar la señal capturada y reducir los efectos de amplificación de la señal durante la etapa de acondicionamiento.

Los filtros digitales empleados en este trabajo son los Filtros FIR dado que su respuesta de fase es lineal. Entre los filtros digitales FIR que son aplicados a la señal con ruido proveniente del fotosensor son: Filtro de la media móvil, Filtro de la mediana, Filtro Savitzky-Golay, Filtro pasa-bajas con ventana Hamming. El objetivo principal de esta investigación consiste en aportar una mejora a un sistema de barrido óptico, el cual fue patentado por la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, en el 2017 con el número de patente MX2014000647 (A). La mejora consiste en minimización del ruido óptico y optoelectrónico del sistema patentado para poder ser utilizado en condiciones ambientales con grandes intensidades de luz solar y otras fuentes luminosas, sin que su desempeño se vea perjudicado (Wendy Flores-Fuentes et al., 2018; Lars Lindner et al., 2017; Lars Lindner et al., 2016; Miranda-Vega et al., 2018; Rodríguez-Quíñonez et al., 2017; O. Sergiyenko et al., 2016)

Un aporte del presente artículo es la comparación de dichos filtros digitales para distintos tipos de fotosensores en un ambiente controlado, con fuentes de ruido que causan interferencia en el transductor del sistema OSS para simular condiciones a la que un sistema OSS está expuesto en un ambiente real de operación.

Los sistemas OSS son ampliamente aplicados en el monitoreo de salud estructural (en inglés, SHM; Structural Health Monitoring) (Baquersad, Poozesh, Niezrecki, & Avitabile, 2017) y en sistemas de navegación (O. Y. Sergiyenko et al., 2016). Los OSS se exponen día a día a condiciones adversas como fuentes de radiación solar o luz artificial. La reducción del ruido optoelectrónico permite mejorar la toma de decisiones al momento en que una desviación o anomalía haya sido detectada sobre la posición de una estructura de un edificio, ya que estos pueden medir los desplazamientos y vibraciones de la estructura. Además estos sistemas son de bajo costo en comparación con sistemas que emplean tecnología basada en fibra óptica, sistemas GPS y los que utilizan videocámaras (Wendy Flores-Fuentes et al., 2014).

Los sistemas OSS son ampliamente utilizados para realizar tareas complejas como obtener la forma de objetos en 3D, aunado a ello, también tienen la capacidad para realizar barridos ópticos sobre estructuras para que posteriormente sean calculadas coordenadas específicas a partir de los puntos capturados de dicha estructura u objeto. Luego de obtener las coordenadas de un objeto o estructura, estas pueden ser utilizadas para poder inferir si dichas características obtenidas por un sistema OSS son correctas o son catalogadas como anomalías con respecto a un patrón de referencia previamente especificado en el sistema. Los sistemas SHM se utilizan para medir los desplazamientos que sufren las estructuras por la carga excesiva y el desgaste natural. Estos sistemas se establecen mediante análisis matemáticos y obteniendo las características dinámicas (Sohn, Czarnecki, & Farrar, 2000).

Los sistemas OSS son una buena opción para poder ejecutar las tareas de caracterización y análisis matemático de estructuras con un muy buen compromiso en costo y eficiencia en comparación de otros sistemas de monitoreo.

Los sistemas basados en fibra óptica reducen el ruido en la señal que es causado por fuentes de radiación, como la luz solar y otras fuentes de radiación (Su, Gao, & Jia, 2017). La fibra óptica suele tener ventajas sobre los sistemas OSS ya que la información que transporta es protegida de los efectos externos por una recubierta de polietileno de alta densidad (González, 2007) que suprime o filtran espectros no deseados. Los sistemas basados en fibra óptica emplean amplificadores ópticos (en inglés, SOA; Semiconductor Optical Amplifier) para amplificar la señal óptica. Estos dispositivos están fabricados a base de materiales semiconductores que reducen los efectos causados por utilizar fuentes incoherentes (McCoy, Thomsen, Ibsen, & Richardson, 2004). Aunque estos dispositivos ofrecen excelentes alternativas para ser empleados en ambientes adversos, el costo de instalación y mantenimiento suele estar muy por encima de los sistemas OSS.

El principio funcional de los sistemas OSS es establecer la relación entre un punto de referencia y el mismo sistema, la cual está representada por el ángulo que existe entre los elementos mencionados anteriormente. A partir de los ángulos calculados por el OSS, la posición del punto de referencia puede ser calculada mediante el método de triangulación dinámica. El sistema OSS se integra por dos subsistemas: el primero es el sistema óptico y el segundo es un sistema optoelectrónico, cada uno de estos sistemas son susceptibles a distintos tipos de ruido que alteran las características o propiedades de una señal durante el procesamiento y captura.

En este artículo se define el ruido optoelectrónico como aquel donde intervienen la captura, procesamiento y conversión de la señal mediante dispositivos electrónicos basados en semiconductores. En el caso del ruido óptico se refiere al ruido donde interviene la lente y el medio por donde viaja la luz.

Es posible aumentar el rendimiento del sistema OSS minimizando el ruido óptico y optoelectrónico mediante la aplicación de filtros digitales (Savory, 2008). Sin embargo, surgen ciertas cuestiones sobre la implementación y el tipo de filtro a emplear. Todas estas cuestiones son abordadas en este trabajo, empleando los filtros FIR como el Filtro de media móvil, Filtro de la mediana, Filtro Savitzky-Golay y el Filtro pasas bajas digital. Así mismo los resultados de estos filtros son confrontados entre sí para poder determinar cuál es el tipo de filtro digital que puede ser empleado bajo ciertas condiciones en nuestro sistema OSS en conjunto con fotosensores como el fotodiodo, LED y un resistor dependiente de la luz (en inglés, LDR; Light-Dependent Resistor), así mismo poder determinar las condiciones de cada conjunto de filtro digital-fotosensor adecuado para minimizar el problema del ruido ambiental en los sistemas OSS.

### 1.1. Ruido en un sistema de barrido óptico

En cualquier diseño de sistemas de barrido óptico, el ruido representa un problema que afecta el rendimiento de dicho sistema.

El ruido optoelectrónico de un OSS puede estar presente por las propias características internas del sistema, o por el sistema de adquisición y procesamiento de la señal, que se requiere controlar o analizar. Un claro ejemplo de lo anterior puede

visualizarse en la Figura 1, donde se pueden apreciar que esta señal tiene varios picos los cuales son referencia para determinar la posición angular que existe entre el OSS y la fuente de referencia. Sin embargo, lo ideal sería tener un único valor pico y no  $n$  número de picos como se muestra en esta figura, ya que el valor máximo de la señal se relaciona con el centro energético. En este trabajo se considera el pico como el máximo local de una señal como el centro energético de la señal y el resto se le considera como ruido, los demás picos son considerados como ruido ya que son de origen aleatorio ya que generan incertidumbre al calcular la posición o ángulo de la fuente de referencia.

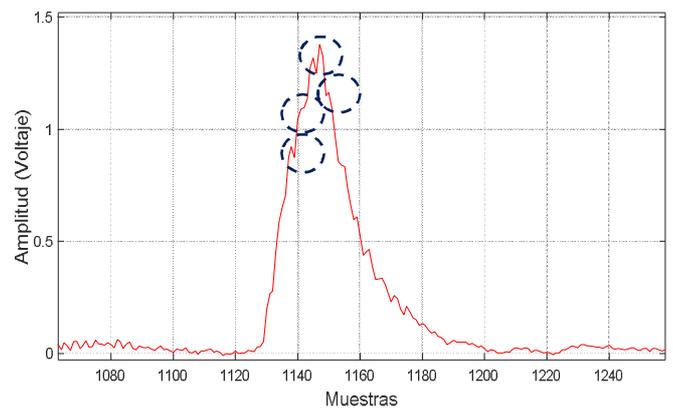


Figura 1: Captura completa de la señal del fotosensor con ruido.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de una señal completa capturada por el fotosensor con picos aleatorios, se logra apreciar claramente que la señal contiene 73 picos, sin embargo, deberían de ser 43 máximos locales de cada señal analógica ya que la fuente de referencia es estática y su centro energético no debe de cambiar, de ahí estriba que un sistema OSS puede medir el desplazamiento o vibración a la que podría estar expuesta una estructura al estar sometida a cargas excesivas o por desgaste natural.

El procesamiento de la señal con ruido da como resultado errores en el cálculo de la posición entre el sistema OSS y la fuente de referencia.

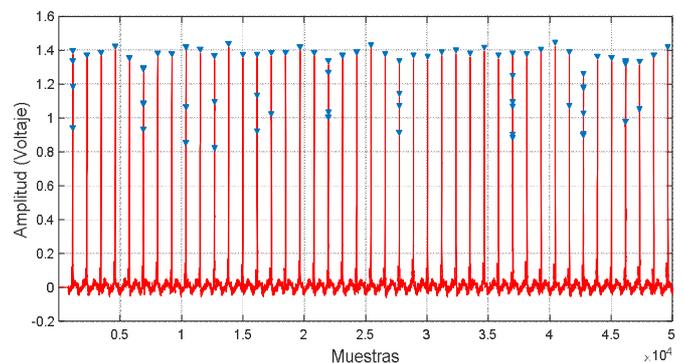


Figura 2: Señal del fotosensor con ruido.

## 2. Descripción y Funcionamiento del Sistema de Barrido Óptico

El presente trabajo se basa en un sistema OSS desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Este sistema se compone principalmente por una fuente de luz que puede ser de tipo

coherente e incoherente, un motor de DC, un fotosensor (fotodiodo, fototransistor, LDR, etc.), un encoder para medir los pulsos del motor, una lente biconvexa y un espejo con un corte a 45° que se encuentra montado sobre el motor.

El principio de operación del sistema es el siguiente: en primer lugar, el motor DC gira a una velocidad constante, este a su vez hace girar a un espejo montado sobre dicho motor, durante este proceso es cuando se realiza el barrido óptico en donde el espejo refleja la luz de la fuente de referencia hacia una lente biconvexa que direcciona la luz en un solo punto, posteriormente la luz es proyectada hacia un fotosensor convirtiendo la señal óptica en eléctrica.

Finalmente la señal eléctrica es capturada por una DAQ para el tratamiento de la señal. La finalidad del OSS es detectar un punto de referencia que es dado por la fuente luminosa. Aplicando el método de triangulación dinámica el sistema calcula el ángulo que relaciona al punto de referencia y la posición de una apertura. Cuando el sistema cuenta con dos aperturas es posible medir la distancia que hay entre las dos aperturas y la fuente de referencia mediante el cálculo de los dos ángulos  $A_{ij}$  y  $B_{ij}$  calculados por cada apertura con respecto al mismo punto de referencia tomado de la fuente luminosa.

El punto de referencia es tomado como el número de muestra o el tiempo donde se encuentre el voltaje pico o máximo local de la señal. Cuando el sistema OSS se sitúa enfrente de la fuente luminosa, se obtiene el valor máximo local de la señal y el ángulo calculado siempre será de 90°, sin importar la frecuencia angular del motor. En (W. Flores-Fuentes et al., 2016) se evalúan varios métodos para la localización del centro energético de la señal, sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente el punto máximo local de cada señal será su centro energético y en base a ese punto se realizarán las mediciones y cálculos de los ángulos.

En la Figura 3, se muestra dos pulsos en color azul los cuales corresponden a una vuelta completa del motor de la apertura, con el conteo de estos pulsos durante un segundo se calcula la frecuencia de barrido  $f_s$ , asimismo se obtiene el periodo  $T$  del sistema OSS.

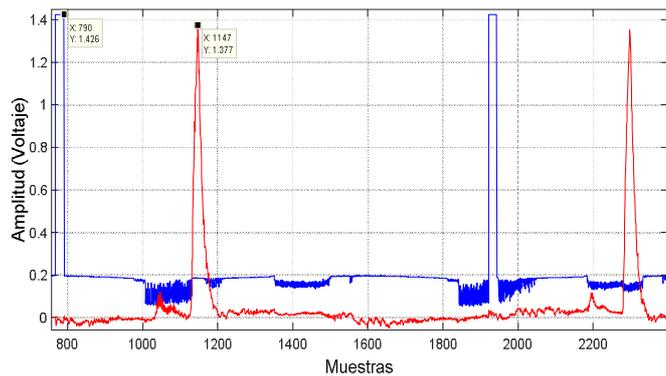


Figura 3: Adquisición de la señal por el sistema óptico. Donde se muestra el número de muestra y amplitud en voltios.

La señal óptica captada por el fotosensor es la que proviene de la emisión de la fuente de referencia, y es representada en esta misma figura en color rojo. Conociendo el número de muestra desde que inicia el flanco de subida del primer y hasta el segundo pulso también se puede calcular el periodo.

Se puede apreciar en la Figura 4 el esquema completo del sistema OSS para realizar la medición de una coordenada o distancia. Esta figura se compone por dos aperturas y una fuente de radiación que representa el punto de referencia para

calcular su posición angular. Con una apertura se calcula el ángulo  $A_{ij}$  mientras que con la segunda apertura se calcula el ángulo  $B_{ij}$ .

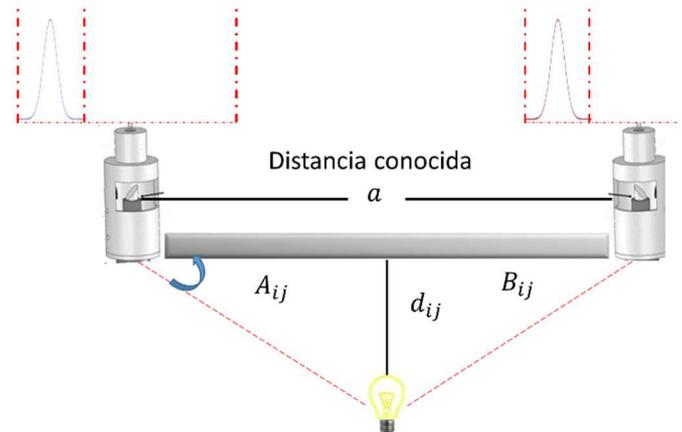


Figura 4: Método de triangulación dinámica. Cada apertura genera un patrón donde su máximo local está relacionado con los ángulos  $A_{ij}$  y  $B_{ij}$

Si se conoce la distancia  $a$  que hay entre las dos aperturas aplicando la ley de senos es posible calcular la distancia  $d_{ij}$ , como se muestra en la Ecuación (1). Donde,  $d_{ij}$  corresponde a la distancia entre la fuente de referencia y el eje que contiene a las aperturas. A este proceso para el cálculo de las coordenadas a través de dos aperturas se le conoce como método de triangulación dinámica, el cual es detallado ampliamente en (Básaca-Preciado et al., 2014). Sin embargo en este trabajo se utilizó solo una apertura del OSS para medir el rendimiento al aplicar los distintos tipos de filtros digitales en conjunto con fotosensores durante la tarea de medición de ángulos en condiciones adversas que pueden ser provocadas por otras fuentes de radiación.

$$d_{ij} = a \frac{\text{sen}(A_{ij})\text{sen}(B_{ij})}{\text{sen}[180^\circ - (A_{ij} - B_{ij})]} \quad (1)$$

Se puede apreciar que en la Figura 4 se muestra el esquema completo del sistema OSS para realizar la medición de una coordenada que es compuesta por dos aperturas y una fuente de radiación que representa el punto de referencia para calcular su posición angular con el previo conocimiento de la distancia  $a$  como la distancia que hay entre las aperturas. Con los parámetros anteriores se mide la distancia  $d_{ij}$  a partir de la Ecuación (1), (Rodríguez-Quiñonez et al., 2014) y (L. Lindner, Sergiyenko, Tyrsa, & Mercorelli, 2014). En la parte superior de cada apertura se observa la señal que es capturada por cada fotosensor, aparentemente esta señal que se forma se asemeja a una curva de tipo gaussiana (W. Flores-Fuentes et al., 2014) y (Rivera-Castillo et al., 2017). Dicha forma depende del tiempo de respuesta de subida y de bajada de cada fotosensor que se ha utilizado como transductor ya que cuando se utiliza otro tipo de fotosensor como la fotoresistencia la señal es similar a una señal tipo diente de sierra. Más adelante son ilustrados los tipos de respuesta de un fotodiodo, un LED y una LDR utilizados como fotosensores en un sistema OSS para el presente trabajo, cabe señalar que para calcular el ángulo de la posición de la fuente de referencia, no depende de la forma de la señal, solamente interesa el punto máximo local de la señal o el centro energético.

### 3. Materiales y Metodología

En esta sección se abordan los materiales y elementos que son empleados para la captura de la señal de referencia, en primera instancia se describen los fotosensores, posteriormente se hace énfasis en los métodos de filtrado implementados en el presente trabajo.

#### 3.1. Fotosensores

Los dispositivos fotosensores son aquellos que conducen una corriente eléctrica cuando se les hace incidir radiación electromagnética o energía radiante como por ejemplo la luz. El proceso de operación de estos dispositivos se basa principalmente en la transición de un electrón desde la banda de valencia hasta la banda de conducción por la absorción de un fotón. Para que se pueda dar el proceso de la fotocorriente se debe de cumplir la condición de la Ecuación (2).

$$h\nu \geq E_g \tag{2}$$

Donde  $h$  es la constante Planck,  $\nu$  es la frecuencia del fotón y  $E_g$  es la banda prohibida del material para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción.

Como  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , la ecuación anterior también puede expresarse en términos de longitud de onda  $\lambda$ . Donde  $c$  es la velocidad de la luz. La Ecuación (3) muestra la relación entre la longitud de onda máxima y la banda prohibida del material del fotosensor.

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \tag{3}$$

La banda prohibida del silicio  $E_g$  es 1.12 eV y para el germanio de 0.66 eV.

En la Tabla 1 se muestran las brechas de energía o la banda prohibida de distintos elementos como el silicio (Si), germanio (Ge), y arseniuro de galio (GaAs). Dado que cada material empleado como fotosensor puede estar sujeto a la Ecuación (3), a partir de esa condición el material deja de conducir. Esto quiere decir que si se eligen elementos fotosensores basados en semiconductores de silicio, su longitud de onda  $\lambda$  máxima se situara en 1109 nm.

Tabla 1: Banda prohibida (eV.)

Material	Band Gap(eV)	Unidades de energía (J)	$\lambda$ (nm)
Silicio	1.12	$1.792 \times 10^{-19}$	1109
Germanio	0.66	$1.056 \times 10^{-19}$	1882
GaAs	1.43	$2.288 \times 10^{-19}$	868
ZnSe	2.7	$4.320 \times 10^{-19}$	460
GaN	3.4	$5.440 \times 10^{-19}$	365

De acuerdo a la Tabla 1, la respuesta espectral estará sujeta a la banda prohibida de cada material y el tipo de fotosensor utilizado.

Para el diseño de sistemas OSS que estén expuestos a la radiación solar, es conveniente considerar materiales que tengan una banda prohibida más grande, esto con el fin de conseguir una longitud de onda menor.

Aprovechando dichas características del fotosensor se tiene que considerar que la fuente de referencia debe de emitir en el rango espectral con un contenido energético muy grande, lo cual sería peligroso para el ser humano.

Las longitudes de onda corta como el ultravioleta (UV) pueden causar quemaduras. Los rayos UV se pueden clasificar en tres categorías UVA, UVB y UVC (Singh, Singh, Prasad, & Parihar, 2017) y de acuerdo a estas categorías el nivel de precaución aumenta en gran medida para esta clasificación respectivamente.

#### 3.2. Fotodiodo

Los fotodiodos son dispositivos optoelectrónicos que al estar en contacto con algún tipo de radiación electromagnética como la luz empiezan a conducir una corriente eléctrica que es directamente proporcional a la intensidad de esta energía a la que está expuesta.

Para la experimentación en este trabajo se utilizó el fotodiodo OPT301 que de acuerdo a la hoja de datos del fabricante Burr-Brown la respuesta espectral de este dispositivo se encuentra entre 200 nm y 1100 nm, teniendo una alta respuesta de 0.47 A/W a 650 nm, en la Figura 5 se aprecia una característica muy común para estos tipos de dispositivos, que es el tener un rango espectral de sensibilidad muy amplio.

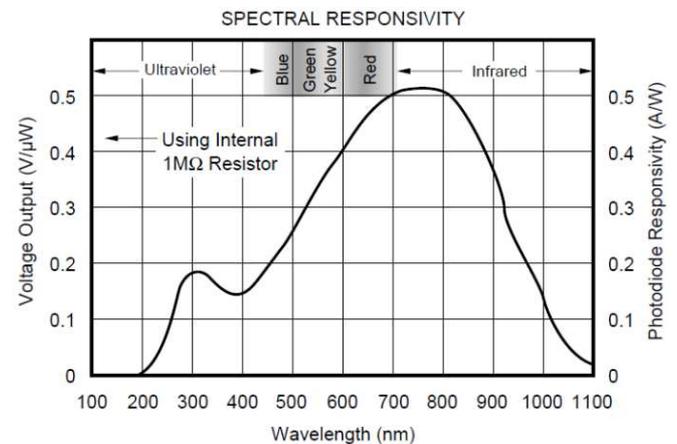


Figura 5: Respuesta espectral del fotodiodo OP301 (Burr-Brown, 1994).

#### 3.3. LED como fotosensor

Los LED's son dispositivos diseñados para emitir energía radiante en una región espectral muy angosta, sin embargo, estos dispositivos ya han sido empleados como fotosensores (Brooks & Mims, 2001), brindando resultados alentadores y sobre todo porque son de bajo costo en comparación con los fotodiodos de instrumentación.

El LED empleado como fotosensor puede ser resumido en la Figura 6, cuando este es polarizado o sometido a un campo eléctrico entre sus terminales de manera directa, los electrones adquieren la suficiente energía y saltan de la banda de valencia hacia la banda de conducción, sin embargo, estos electrones solo pueden mantenerse por muy poco tiempo en un estado de

mayor energía y cuando estos regresan a la banda de valencia de menor energía emiten energía radiante (luz) en cierta longitud de onda que depende de la fabricación del LED.

El proceso para utilizar el LED como fotosensor es de la forma inversa, es decir que cuando el LED es expuesto ante una energía radiante de la misma o mayor longitud de onda se generan pares electrón-hueco o portadores de carga dando como resultado una disminución de la resistencia del material semiconductor, permitiendo la circulación de una corriente eléctrica denominada fotocorriente esto debido a que la energía de un fotón fue cedida a un electrón.

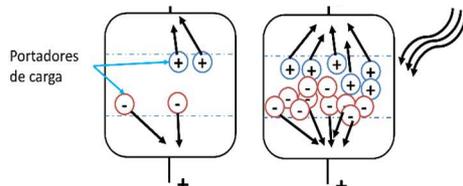


Figura 6: Funcionamiento de LED como fotosensor.

#### 4. Métodos de Filtrado Digital

Los filtros digitales son herramientas computacionales cuyo principio de operación está basado en filtros analógicos para discriminar componentes de frecuencia no deseada de una señal contaminada y también para resaltar características específicas de la señal de referencia. Entre los tipos de filtros más comunes se encuentran los filtros pasa-bajas, pasa-altas, paso de banda, rechaza banda.

Una de las principales ventajas que presentan los filtros digitales sobre los filtros analógicos es que permiten la reducción de espacio físico del filtro, además de que estos pueden ser rediseñados sin la necesidad de modificar la parte física del sistema ya que solo se modifica el algoritmo. Esto en comparación con los filtros analógicos en los cuales sería necesario cambiar los componentes como capacitores, inductores, resistencias y posteriormente rediseñar el sistema de adquisición y procesamiento.

Existen dos grupos dentro de los filtros digitales que se dividen de acuerdo a su estructura computacional en dos grupos como: los filtros FIR y los filtros de respuesta infinita al impulso (del inglés, IIR; Infinite Impulse Response). La forma general de los filtros digitales puede describirse mediante los siguientes elementos:

Los filtros FIR o respuesta finita al impulso, son filtros digitales que tienen la bondad de poder diseñarse para que su respuesta de fase sea lineal, estos tipos de filtros son *no recursivos*, esto debido a que las salidas solo dependen de las entradas presentes y previas.

Por otro lado, estos tipos de filtros requieren más memoria para el diseño de filtros de alto orden, esta sería una desventaja comparado con los filtros IIR, sin embargo, para aplicarlos a los sistemas OSS el filtro FIR sería lo más conveniente debido a que su respuesta es de fase lineal. Estos tipos de filtros causales pueden describirse por medio de la siguiente Ecuación (4).

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k [n - k] \tag{4}$$

Donde  $b(k)$  son los términos sucesivos de la respuesta del filtro al impulso, es decir, los coeficientes que definen el desempeño del filtro. La siguiente Ecuación (5) representa la función de transferencia de  $y[n]$ .

$$H [z] = \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} \tag{5}$$

El diseño de los filtros FIR propuestos se basa en el uso de ventanas, en donde se multiplica la respuesta al impulso finito  $h[n]$  con la ventana  $w[n]$ . La respuesta al impulso  $h[n]$  puede ser calculada mediante Ecuación (6). Entre las funciones ventana se encuentran la ventana rectangular, la ventana Hamming, la ventana Hanning, la ventana Blackman y la ventana Bartlett. En la Tabla 2, se muestran 5 ejemplos de funciones ventana para el diseño de filtros digitales tipo FIR por el método de ventanas  $h[n]$  y  $w[n]$ .

Tabla 2: Ejemplos de funciones Ventana para filtros FIR y la atenuación de correspondiente en la banda de rechazo.

Tipo de Ventana	Función de la ventana $w[n]$	Atenuación (dB)
Rectangular	1	13
Hamming	$0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$	41
Blackman	$0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$	57
Hanning	$0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$	31
Bartlett	$\begin{cases} 2n/N-1, & 0 \leq n \leq (N-1)/2 \\ 2-2n/N-1, & (N-1)/2 < n \leq (N-1)/2 \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$	27

$$h_d[n] = w[n]h[n] = \left[ 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right] \frac{\sin\left[w_c(n-M)\right]}{\pi(n-M)} \tag{6}$$

##### 4.1. Filtro de la media (Moving Average)

El filtro de la media es uno de los filtros digitales más utilizado en el procesamiento digital de señales (en inglés, DSP; Digital Signal Processing) debido a que son sencillos en su implementación, estos tipos de filtros tienen la estructura de los filtros FIR. El filtro de la media sirve para suavizar la señal y reducir el ruido (Smith, 1999).

De acuerdo a la Ecuación (7), para el funcionamiento de este tipo de filtro primero se elige la cantidad de puntos con los cuales se desea filtrar, a lo que se le denomina el tamaño de la ventana  $W$ .

$$y[n] = \frac{1}{W} \sum_{j=0}^{W-1} x[i+j] \tag{7}$$

Luego se calcula la media aritmética sobre los datos que se encuentran dentro del tamaño de la ventana, donde cada  $x[i]$  es remplazado por  $y[i]$  que es calculado iterativamente a lo largo del vector  $x[i]$ .

4.2. Filtro Savitzky-Golay

El filtro Savitzky-Golay es utilizado para suavizar una señal mediante un polinomio (Savitzky & Golay, 1964), en esencia es el filtro de la media móvil ponderado por un polinomio expresado en Ecuación (8), del número de orden  $N$ .

$$p(n) = a_0 + a_1n + a_2n^2 + \dots + a_n n^n = \sum_{j=0}^N a_j n^j \quad (8)$$

Que minimice el error cuadrático entre el polinomio de aproximación y la secuencia de la señal mediante la siguiente Ecuación (9).

$$\epsilon_N = \sum_{n=-M}^M (p(n) - x[n])^2 \quad (9)$$

La señal suavizada  $y[n]$  para la secuencia de entrada  $x[n]$  en  $n = 0$  se obtiene tomando el valor del polinomio  $p(n)$  en  $n = 0$ .

Donde  $A$  es llamada la matriz de diseño y esta es expresada por Ecuación (10) y  $c_n$  son los coeficientes que se obtienen mediante factorización  $LU$  de Ecuación (11).

$$A = \{n^i\}, -M \leq n \leq M, i = 0, 1, \dots, N \quad (10)$$

$$c_n = \sum_{m=0}^M \left\{ (A^T \cdot A)^{-1} \right\}_m n^m \quad (11)$$

5. Procedimiento para la Medición de los Ángulos del Sistema OSS

El procedimiento para obtener el ángulo entre el sistema OSS y la fuente de referencia empieza determinando los máximos de cada señal analógica ( $M_1, M_2$  y  $M_3$ ), esto puede apreciarse en la Figura 7.

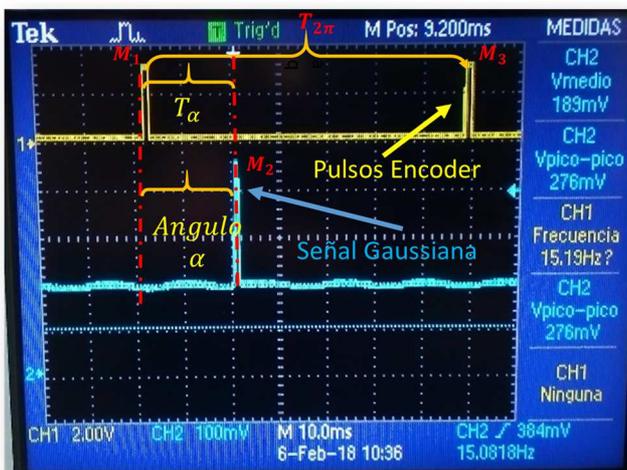


Figura 7: Captura de los picos M1, M2 y M3 de las señales del fotosensor (señal gaussiana) y de los pulsos del encoder.

En la Figura 7 se muestra la pantalla desplegada por el osciloscopio con las 2 señales, en donde la señal de color amarillo representa los pulsos que envía el encoder por cada vuelta completa ( $M_1$  y  $M_3$ ). La señal en color azul turquesa (señal gaussiana) es desplegada en el canal 2 del osciloscopio que proviene del fotosensor, se puede apreciar que esta señal tiene un máximo local el cual es representado como  $M_2$ .

Los pulsos que se generan en una vuelta completa del motor DC son llamados  $M_1$  y  $M_3$ , la razón de que sean en este orden es porque el algoritmo empleado en este trabajo asigna  $M_1$  solo al primer pulso del encoder, en caso de que durante la captura ocurra primero el pico de señal de la gaussiana, el algoritmo es condicionado para esperar el siguiente pulso que correspondería al pulso del encoder  $M_1$ , por esta razón el siguiente pulso del encoder siempre será etiquetado por el algoritmo como  $M_3$ , dado que  $M_2$  ya fue asignado al pico de la Gaussiana (fotosensor).

Mediante la siguiente Ecuación (12) se calcula el tiempo  $T_{2\pi}$ , que transcurre durante una vuelta completa del motor DC.

$$T_{2\pi} = M_3 - M_1 \quad (12)$$

Una vez conocido el tiempo  $T_{2\pi}$  se puede determinar el tiempo entre  $M_1$  y  $M_2$ , denotado como  $T_\alpha$  mediante la siguiente relación expresada en Ecuación (13).

$$T_\alpha = M_2 - M_1 \quad (13)$$

Conociendo los parámetros anteriores  $T_{2\pi}$  y  $T_\alpha$  se puede determinar el ángulo  $\alpha$  mediante la siguiente Ecuación (14).

$$\alpha = \frac{2\pi T_\alpha}{T_{2\pi}} \quad (14)$$

Donde  $2\pi = 360^\circ$  y  $\alpha$  en grados.

Dependiendo de la frecuencia y el tiempo de barrido los ángulos  $\alpha$  son guardados en (15); por ejemplo, si la frecuencia de barrido del sistema OSS es de 19 Hz y el tiempo de la muestra es de 1 segundos el número de elementos del vector será 18, los que representan los ángulos calculados en 1 segundo de acuerdo a Ecuación (20), la Figura 9 contiene los picos en el tiempo  $\alpha$ .

$$[\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_m] \quad (15)$$

Donde  $m =$  representa el número de elementos del vector, el cual puede ser calculado mediante  $p_s$  que corresponde al número entero de pulsos del encoder que hay en un ciclo de barrido.

$$m = p_s - 1 \quad (16)$$

En la Figura 8 se aprecia la captura de 1 segundo a una frecuencia de barrido de 19 Hz, cabe señalar que los pulsos del encoder son los de color azul y la señal Gaussiana que proviene del fotosensor es de color naranja. El tamaño del vector tendrá como límite del vector al pico  $\alpha_{18}$ .

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{18}] \quad (17)$$

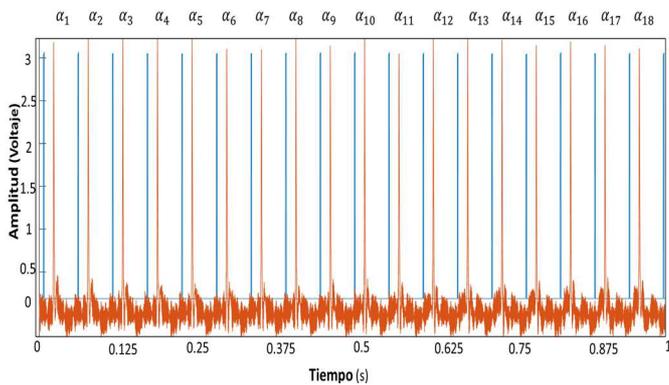


Figura 8: Captura del sistema OSS con una duración de 1 segundo.

### 6. Adquisición y Procesamiento de las Señales

El proceso de adquisición de datos se realizó mediante la tarjeta DAQ 6003 de National Instrument, donde para los dos canales para la adquisición de la señal la tasa de muestreo fue de 50 kS/s. En la Figura 9 se aprecia la captura de un LED azul utilizado como fotosensor la cual tiene una forma similar a una curva Gaussiana, sin embargo, esta señal del sensor presenta ruido.

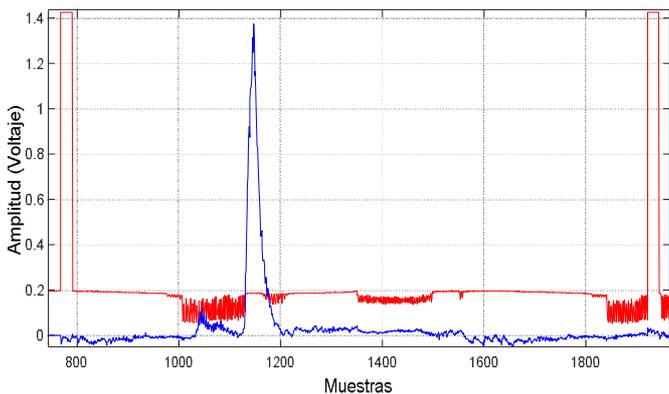


Figura 9: Señal capturada de un LED azul por DAQ. La señal del LED como fotosensor se ilustra en color azul y los pulsos en color rojo.

La Figura 10 muestra la señal procesada de una LDR, nótese que la forma de la señal es distinta a la obtenida por el LED azul y al fotodiodo OPT301, esto es debido a que las características optoelectrónicas de este dispositivo son diferentes a las de los elementos que están basado en materiales de unión PN. En esta figura se aprecian 3 picos o máximos locales de la señal los cuales están relacionados con fuentes de radiación empleados para la experimentación con la fotoresistencia. Las dos fuentes con mayor amplitud corresponden a un bulbo automotriz y una lámpara incandescente, y la tercera fuente corresponde a un LED de color violeta. Debido a que la mejor respuesta espectral de la LDR utilizada para este experimento se encuentra entre los 500 nm y 600 nm, la fuente de referencia para esta sesión será la lámpara incandescente, misma que se encuentre en esta figura con el número de muestra 1642. El segundo pico más alto se aprecia en el número de muestra 1570 lo genera el bulbo automotriz. El tercer pico que se identifica con pico en el número de muestra 1760 fue generado por un LED rojo.

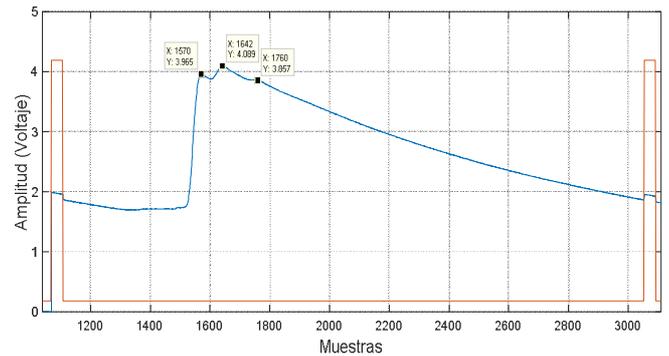


Figura 10: Señal generada por una fotoresistencia.

La frecuencia de barrido óptico efectuado por el sistema OSS fue de 25 Hz. Lo que resulta en total de 24 señales capturadas entre cada 2 pulsos del motor. Se hace énfasis en que de las 24 señales se toma el valor del pico generador por el bulbo automotriz en donde la señal registra su punto máximo local, ya que con este valor se realiza el cálculo del ángulo entre el sistema y la fuente de referencia. Como ya antes se indicó que de los 3 picos que se visualizan en la Figura 11 solo se toma uno como referencia y este está localizado a 104° con respecto al sistema OSS.

En la Figura 11 se muestra la señal capturada utilizando el fotodiodo OPT301 como transductor del sistema OSS. Se puede apreciar en la imagen la cresta más grande es generada por el bulbo automotriz, la cresta más pequeña cuya amplitud es de aproximadamente 1.2 voltios que se encuentra en el número de muestra 1231 es generada por la lámpara incandescente, en caso de la tercera fuente que es un LED violeta, no es perceptible por el fotodiodo OPT301.

Las características más sobresalientes de la captura con el fotodiodo OPT301 son que el tiempo de respuesta de subida y de bajada son casi idénticos lo que produce una gráfica similar a una Gaussiana, otra característica interesante es la aparente falta de ruido eléctrico en la señal, es decir, con una relación de señal-ruido muy baja. Esto debido principalmente a que este es un dispositivo de instrumentación que amplifica la corriente generada por el fotodiodo empleando un amplificador operacional en configuración de transimpedancia con un capacitor de 40 pf en retroalimentación. En esta configuración el dispositivo convierte la señal de corriente en una tensión en la salida mediante una resistencia de realimentación.

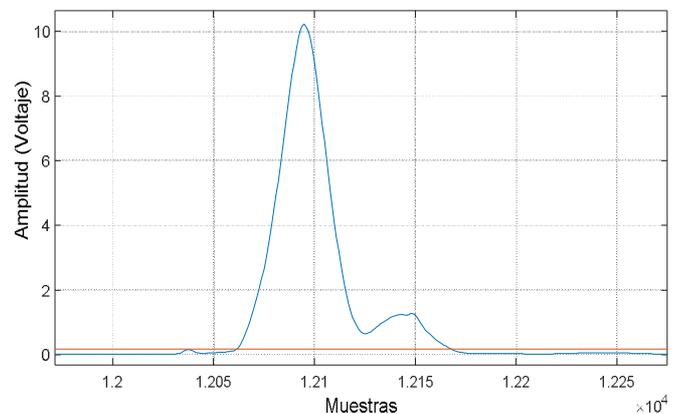


Figura 11: Ciclo completo de la señal capturada utilizando un fotodiodo (OPT301).

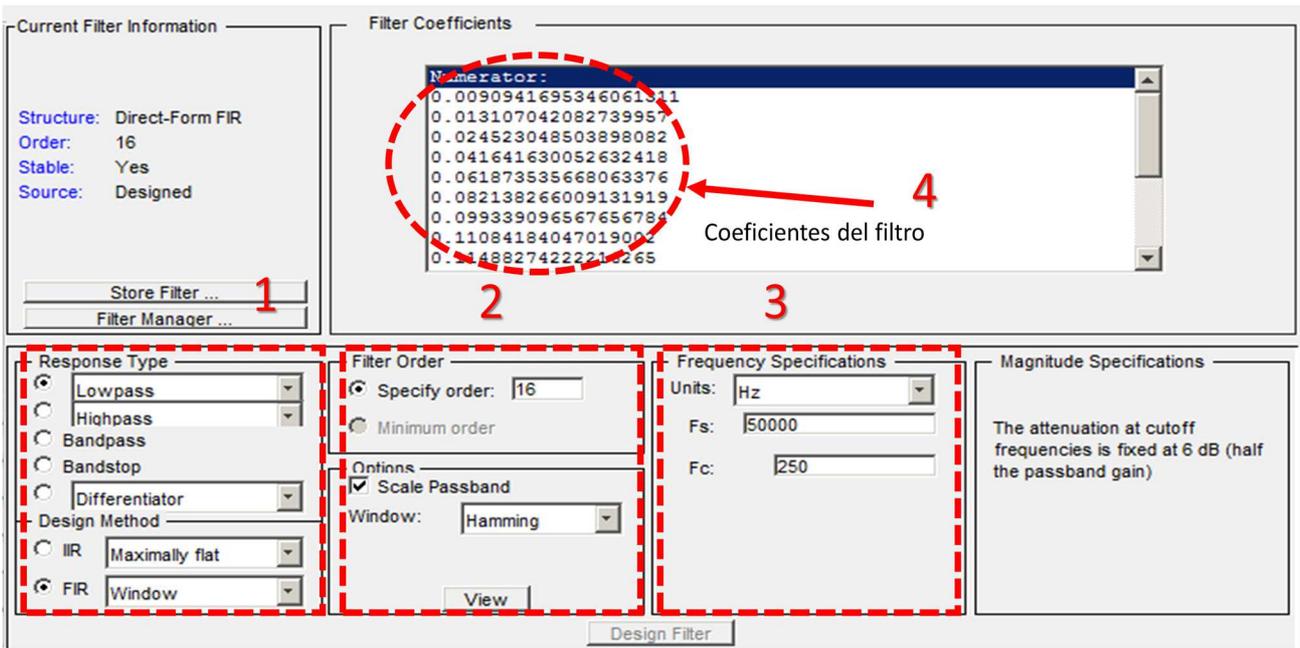


Figura 12: Diseño del Filtro FIR mediante Matlab.

6.1. Implementación de los Filtro Digitales FIR

El diseño del filtro FIR pasa-bajas utilizando una ventana Hamming se realiza por medio de software mediante la herramienta *fdatool* de Matlab.

En el paso 1 de la Figura 12, se especifica el tipo filtro pasa-bajas y también se selecciona el método para el diseño del filtro empleando una ventana. El paso número 2 especifica el orden del filtro de 17 coeficientes y el tipo de ventana a utilizar Hamming. Las especificaciones en frecuencia del filtro son la frecuencia de muestreo de 50,000 muestras/segundo y la frecuencia de corte de 250 Hz mostrada en el paso 3.

En el paso número 4 se observan los coeficientes del filtro *hd* como se muestran en (18), calculados por esta herramienta y que fueron utilizados en el presente trabajo.

6.2. Implementación del Filtro de la Media Móvil

Los datos experimentales de la señal filtrada aplicando el filtro de la media móvil fueron obtenidos mediante la Ecuación 11, de esta manera se calcula la media aritmética sobre los datos que se encuentran dentro del tamaño de la ventana *W* que para este ejemplo visualizado en (18), fue de un tamaño de 16, así cada  $x[i]$  es remplazado por  $y[i]$  que es calculado iterativamente a lo largo del vector  $x[i]$ . El dato de la señal con ruido  $y[-0.0054]$  fue remplazado por el promedio  $x[-0.0072]$ , de forma iterativa se reemplaza cada elemento del vector hasta obtener una señal suavizada eliminando los picos de la señal.

$$y[-0.0054] = \frac{[x[-0.0054] + x[-0.0022] + x[-0.0141] + x[-0.0051] + x[-0.0044] + \dots + x[-0.0059]]}{16} \quad (18)$$

En Figura 13 se muestra al proceso para obtener el filtrado de la señal empleando el filtro de la media. Se puede notar que la señal capturada del fotosensor que está representada en color rojo tiene muchos picos, contrastando con la señal en color azul que muestra la señal filtrada empleando el filtro de la media móvil, con esto se reduce a solo un valor pico para la señal que está relacionado con su centro energético como se había comentado anteriormente.

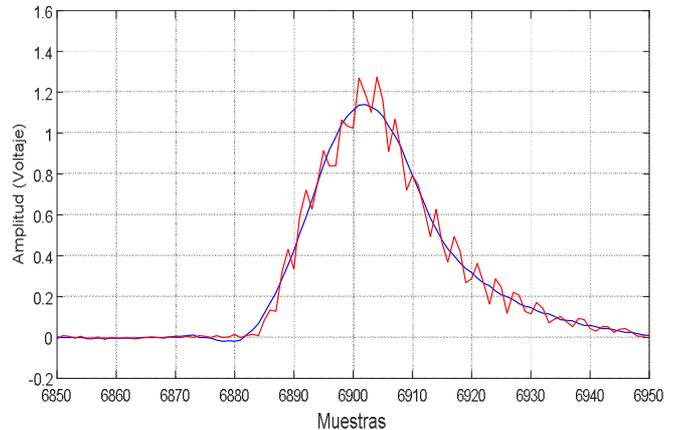


Figura 13: Aplicación del filtro de la media móvil a la señal capturada por el fotosensor con ruido.

6.3. Implementación del Filtro Savitzky-Golay

Para obtener los coeficientes del filtro Savitzky-Golay se emplea la siguiente función  $g = \text{SavGol}(f, nl, nr, M)$  ampliamente detallada en (Gander, 1997), donde *nl* corresponde al número de puntos usados a la izquierda y *nr* al número de puntos usados a la derecha, *M* representa el grado del polinomio y *f* representa a la señal con ruido. Los resultados que se visualizan en la Tabla 3 aplicando el filtro digital Savitzky-Golay fueron calculados a partir de los parámetros a  $nl = nr = 16$ , y  $M = 4$ .

Los coeficientes del filtro Savitzky-Golay para los parámetros mencionados anteriormente se visualizan en (19).

$$c = \begin{bmatrix} 0.0369 \\ 0.0025 \\ -0.0190 \\ -0.0297 \\ -0.0316 \\ \vdots \\ 0.0369 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para poder visualizar la respuesta en frecuencia del filtro digital diseñado anteriormente se emplea la función de Matlab `freqz(B,A,N)`, donde B y A corresponden a los coeficientes del denominador y numerador de una función de transferencia. En la Figura 14 se muestra la respuesta en frecuencia de los coeficientes de Savitzky-Golay obtenidos en (19).

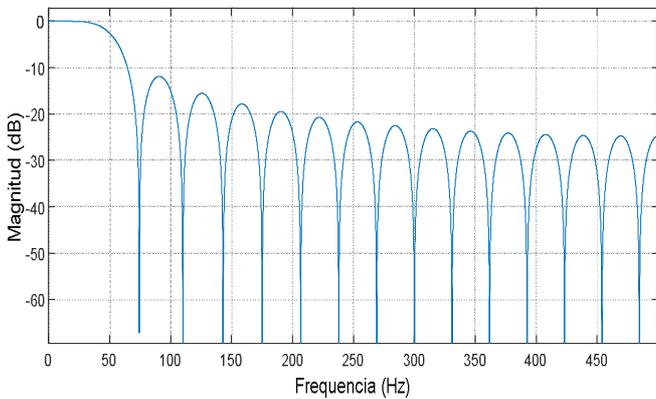


Figura 14: Respuesta en frecuencia del filtro Savitzky-Golay.

### 7. Resultados

En esta sección de resultados el orden será detallado tomando como referencia los datos de la Tabla 3. En primer lugar se explicaran los resultados obtenidos con el LED azul, luego se mostrarán los resultados empleando la LDR y finalmente los resultados con el fotodiodo OPT301. Cabe señalar que estos dispositivos fueron sometidos a ruido óptico generado por fuentes de radiación en el espectro visible (Bulbo automotriz, lámpara incandescente y LED violeta, LED rojo). Además se presenta los estadísticos en Tabla 3 una comparación de los resultados de las señales filtradas mediante el filtro Savitzky-Golay, filtro de la media y un filtro FIR pasa-bajas con una ventana Hamming. Los experimentos para cada fotosensores fueron realizados en sesiones diferentes.

Los resultados obtenidos con el LED azul como fotosensor sin aplicar ningún tipo de filtro digital se visualizan en la columna 5, en esta columna el valor promedio del vector de los ángulos calculados es de  $187.601^\circ$  lo cual da como resultado un error de  $70.601^\circ$  con respecto a la posición real de la fuente de referencia (LED violeta) de  $117^\circ$ .

La fuente de radiación empleada para el LED azul como fotosensor fue un LED de color violeta, sin embargo, también

se pudo haber empleado un LED de color azul. Como fuentes de ruido para el experimento fueron utilizados un bulbo automotriz de 12v y una lámpara de luz incandescente de luz blanca. Cuando la señal del LED azul es filtrada con el filtro de la media móvil a la señal del LED azul se disminuye el porcentaje de error hasta en un 99.03% tomando como referencia los resultados de la señal sin ningún tipo de filtro. Además cuando a la señal del LED azul se le aplica el filtro digital Savitzky-Golay el error se reduce a  $0.537^\circ$  lo cual representa una disminución de error 99.23% con respecto al cálculo del ángulo sin filtro digital que es de  $70.601^\circ$ . La disminución en términos de porcentaje de error para este mismo dispositivo aplicando el filtro FIR pasa-bajas fue de 98.92%.

En los resultados estadísticos calculados sobre el vector del ángulo calculado se aprecia que de las desviaciones estándar para el filtro de la media es de  $0.198^\circ$ , para el filtro Savitzky-Golay es de  $0.212^\circ$  y para el filtro FIR pasa-bajas es de  $0.216^\circ$ .

Cuando la señal no es filtrada la dispersión de los ángulos calculados aumenta a  $106.982^\circ$ . El error cuadrático medio de la señal (en inglés, MSE; Mean Squared Error) de la señal sin filtro fue de  $16217.688^\circ$  contra el MSE de los filtros Savitzky-Golay, filtro de la media y el filtro FIR pasa-bajas que son de  $0.332^\circ$ ,  $0.498^\circ$  y  $0.6230^\circ$  respectivamente. En la Figura 15 se muestra una representación gráfica de los resultados obtenidos en la Tabla 3 para la señal capturada con el LED azul y un LED violeta como fuente de referencia. La línea en color rojo representa a la señal capturada sin ningún tipo de filtrado. Otro detalle que resalta en esta figura, es el desempeño del LED azul, debido a que solo detectó la fuente de radiación emitida por el LED violeta. En la Figura 16 se muestra el resultado del suavizado de la señal aplicando un filtro FIR pasa-bajas para la señal capturada con el LED azul (color azul) en conjunto con la señal que contiene ruido eléctrico filtrado (color rojo). Los parámetros del filtro FIR son: un filtro pasa-bajas con frecuencia de corte de 250 Hz con un número de orden del filtro de 16.

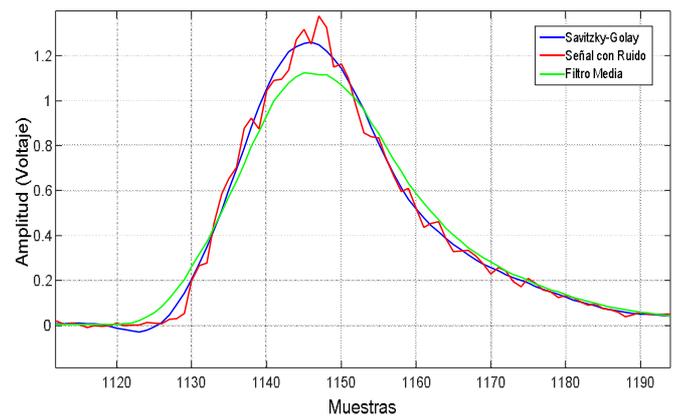


Figura 15: Señal filtrada por Savitzky-Golay (línea roja), señal filtrada con el filtro de la media (línea verde) la señal con ruido eléctrico (línea azul).

La fuente de luz implementada fue un LED de color violeta, se puede apreciar que tanto el filtro Savitzky-Golay como el filtro FIR pasa-bajas no atenúan la señal en comparación con el filtro de la media. Los resultados aplicando filtro FIR pasa-bajas y el filtro Savitzky-Golay son muy similares en cuanto a la forma de la señal filtrada y los datos obtenidos en la Tabla 3.

Tabla 3: Estadísticos calculados para las señales capturadas por los dispositivos como: fotodiodo OPT301, LDR y LED azul como fotosensor aplicando filtrado digital mediante el algoritmo de Savitzky-Golay (NL y NR=16 y M=4), filtro de la media con una ventana W= 16 y Filtro FIR pasa-bajas aplicando una ventana tipo Hamming (16 coeficientes y frecuencia de corte de 250 Hz). Los resultados del error para cada uno de los fotosensores están en grados.

Fotosensor OSS	Estadísticos	Savitzky-Golay	Filtro Media	Filtro FIR	Señal sin Filtro	Error sin Filtro	Error con Filtro Media	Error con Savitzky-Golay	Error con Filtro FIR Pasa-bajas (Hamming)
LED Azul (3mm)	Media	117.537	117.678	117.759	187.601	70.601	0.678	0.537	0.7599
	Desviación Estándar	0.212	0.198	0.216	106.982				
	MSE	0.332	0.498	0.6230	16217.688				
LDR	Media	104.106	104.348	104.1817	183.531	79.531	0.348	0.106	0.1817
	Desviación Estándar	0.125	0.122	0.1356	92.852				
	MSE	1.239	1.831	1.4142	15053				
Fotodiodo (OPT301)	Media	90.240	90.351	90.233	90.218	0.218	0.351	0.240	0.233
	Desviación Estándar	0.220	0.223	0.223	0.224				
	MSE	0.105	0.171	0.1039	0.096				

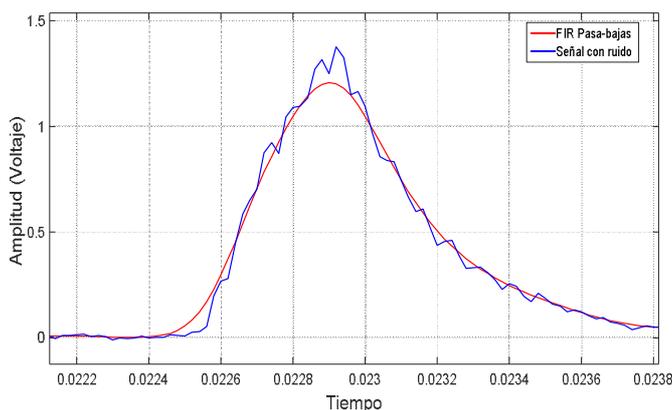


Figura 16: Señal filtrada (color rojo) con filtro FIR pasa-bajas con 16 coeficientes y frecuencia de corte a 250 Hz utilizando a un LED azul como fotosensor. La señal en color azul representa a la señal de salida del fotosensor LED azul.

Los resultados empleando la LDR que se muestran en la Tabla 3, fueron obtenidos de la siguiente manera. Cuando el sistema OSS calcula el ángulo con la señal con ruido se genera un error de 79.531° con respecto a la posición de 104° de la fuente de referencia que en el caso de la LDR fue la lámpara incandescente. Con el filtro de la media se reduce el error a un 99.56% y con el filtro Savitzky-Golay se reduce hasta un 99.86% finalmente el porcentaje de error disminuido aplicando el filtro FIR fue de 99.77%.

En la Figura 17 se distingue en color rojo la señal de la LDR sin aplicar ningún tipo de filtro, la señal que está representada en color azul corresponde a la señal filtrada con el filtro Savitzky-Golay, por último color verde corresponde a la señal de la LDR filtrada con el filtro de la media móvil con una ventana  $W = 16$ .

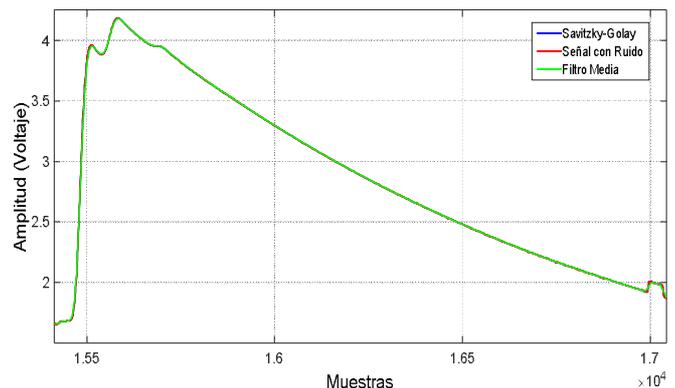


Figura 17: Señal generada por una fotoresistencia.

La desviación estándar calculada del vector de los ángulos medidos por el sistema OSS aplicando Savitzky-Golay, filtro de la media y el filtro FIR fue de 0.125°, 0.122° y 0.1356° contra una desviación estándar de 92.852° de cuando el sistema OSS procesa la señal sin filtro. Las Figuras 17, 18 y 19 ilustran el proceso de filtrado de la LDR. Aparentemente no se modifica mucho la forma de la señal, sin embargo, se realiza un acercamiento ilustrado en la Figura 18, donde se puede apreciar el ruido que se genera durante la captura con la LDR evidenciado por los pequeños picos de la señal del gráfico en color rojo de dicha figura.

Como se aprecia en todas las figuras de la LDR (Figura 17, 18 y 19), ningún tipo de filtro elimina la cresta de la fuente de ruido (círculo naranja) que se captura con la LDR, ilustrado en Figura 19. Sin embargo todos los filtros suavizan el contorno de la señal (color rojo) eliminando las pequeñas variaciones (en color azul).

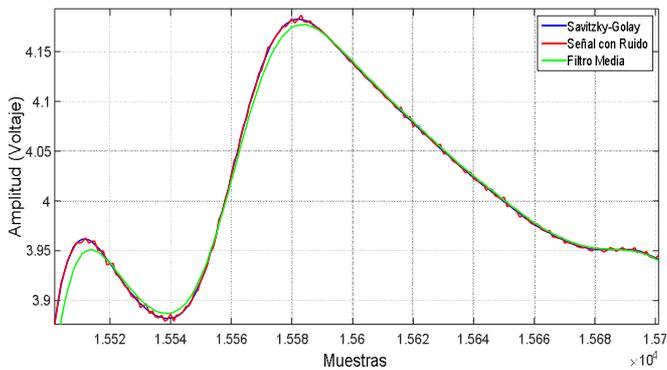


Figura 18: Señal generada por una fotoresistencia LDR.

El tipo de filtro aplicado que se muestra en la Figura 19 corresponde al filtro FIR pasa-bajas con 16 coeficientes y frecuencia de corte a 250 Hz.

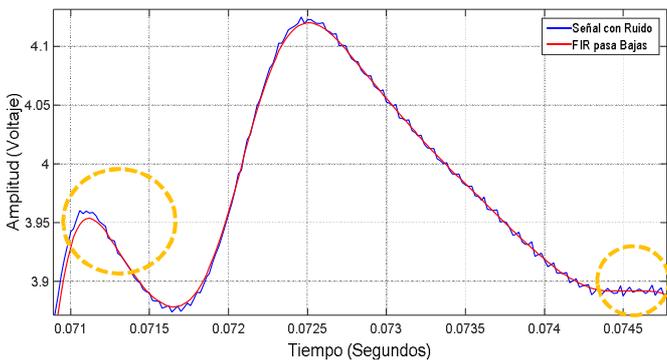


Figura 19: Señal filtrada por un filtro FIR pasa-bajas, con Frecuencia de corte de 250 Hz, y orden de filtro de 10 coeficientes;

En la Figura 20, se muestra la señal filtrada con Savitzky-Golay, filtro de la media y el filtro FIR pasa-bajas, como se puede observar la señal no presenta picos como las señales capturadas anteriormente con el LED azul y la LDR. Este atributo se puede validar en los resultados de la Tabla 3 que de acuerdo al error obtenido en la columna 7 la señal capturada con el fotodiodo OPT301 arroja un error de  $0.218^\circ$  que es calculado por el sistema OSS con referencia a la posición real de la fuente de referencia. El error que se genera sin filtrado de la señal que proviene del fotodiodo OPT301 es de  $0.218^\circ$  está muy por debajo con el error de  $70.601^\circ$  calculado con el LED azul y de  $79.531^\circ$  con la LDR. La Figura 20 evidencia los resultados obtenidos en la Tabla 3 donde no hay cambios significativos ya que esta no presenta los picos que generan el error durante el cálculo de los ángulos por parte del sistema OSS.

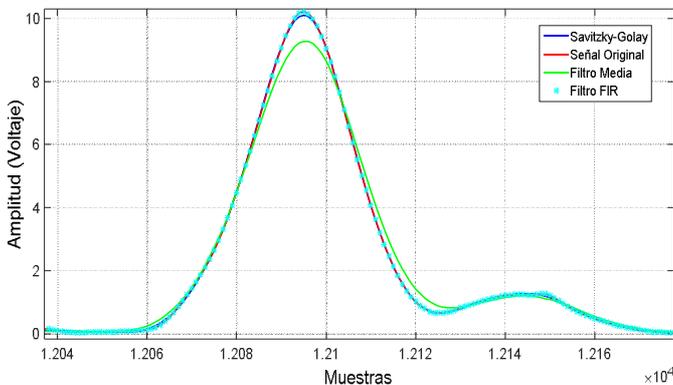


Figura 20: Señales filtradas con filtro Savitzky-Golay (azul), filtro de la media móvil (color verde) y un filtro FIR pasa-bajas (color cian, la señal en rojo corresponde la señal original utilizando al fotodiodo OPT301 como transductor del sistema OSS.

En la siguiente Figura 21, se muestra el error obtenido para cada uno de los coeficientes y el número de orden del filtro, el procedimiento para realizar el experimento se llevó a cabo mediante 23 configuraciones distintas donde se modifica un parámetro por cada tipo de filtro, en el caso del filtro Savitzky-Golay el parámetro  $n_l$  y  $n_r$  fueron modificados igualmente empezando desde el número 7 hasta el número 29, de esta misma forma se realiza la gráfica del filtro FIR solo que en este filtro lo que se fue modificando fue el número de orden del filtro (7 a 29).

Cabe señalar que el filtro de la media no se tomó en cuenta dado que este filtro atenúa la amplitud de la señal a medida que se incrementa el tamaño de la ventana, lo cual resultaba en errores para poder calcular la posición de la señal de referencia con respecto a la posición de la apertura, anteriormente se menciona que el voltaje pico de cada señal representa nuestro centro energético, y para calcular este punto se requiere un nivel de referencia fijo, en el caso del filtro de la media la señal se atenúa hasta por debajo de este nivel lo que resultaba errores en la captura del ángulo.

Los Filtros FIR y Savitzky-Golay atenuaron por arriba del nivel mínimo de referencia, así mismo se pudo capturar la muestra de 23 errores MSE. El error cuadrático medio obtenido aplicando filtro Savitzky-Golay es ligeramente mayor ( $0.67^\circ$ ) con respecto al filtro FIR pasa-bajas ( $0.6409^\circ$ ) en la primera iteración del algoritmo que fue empleado para calcular cada MSE en cada configuración, sin embargo, a medida que el algoritmo calcula los siguientes parámetros para cada filtro, el error cuadrático disminuye más para el filtro Savitzky-Golay.

El mejor resultado de Savitzky-Golay en términos de MSE es  $0.2059^\circ$  que representa el error más pequeño en  $n_l$  y  $n_r = 12$  para todo este experimento. El Filtro FIR obtiene su mejor respuesta en términos de MSE de ( $0.4578^\circ$ ) con un número de orden de 18.

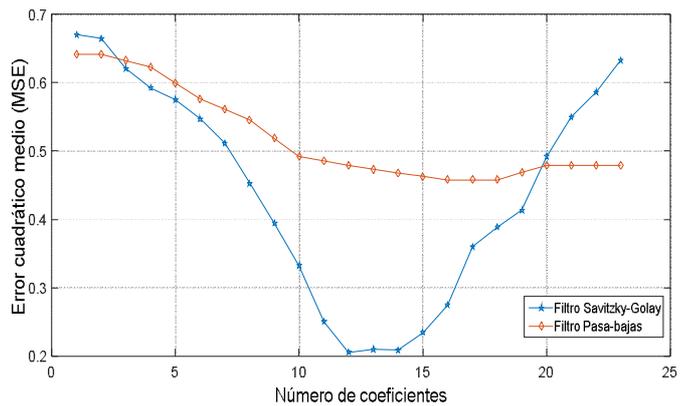


Figura 21: Error cuadrático medio de la señal filtrada con: filtro Savitzky-Golay (color azul) y filtro FIR pasa-bajas (color rojo) con EL LED como fotosensor.

En la Figura 22 se aprecia cómo va disminuyendo el error cuadrático medio en función del incremento en el número de coeficientes y parámetros para los tipos de filtro FIR pasa-bajas y Savitzky-Golay respectivamente. Los resultados de estos tipos de filtros fueron satisfactorios en función del error cuadrático medio calculado a partir de las señales filtradas y las señales con ruido.

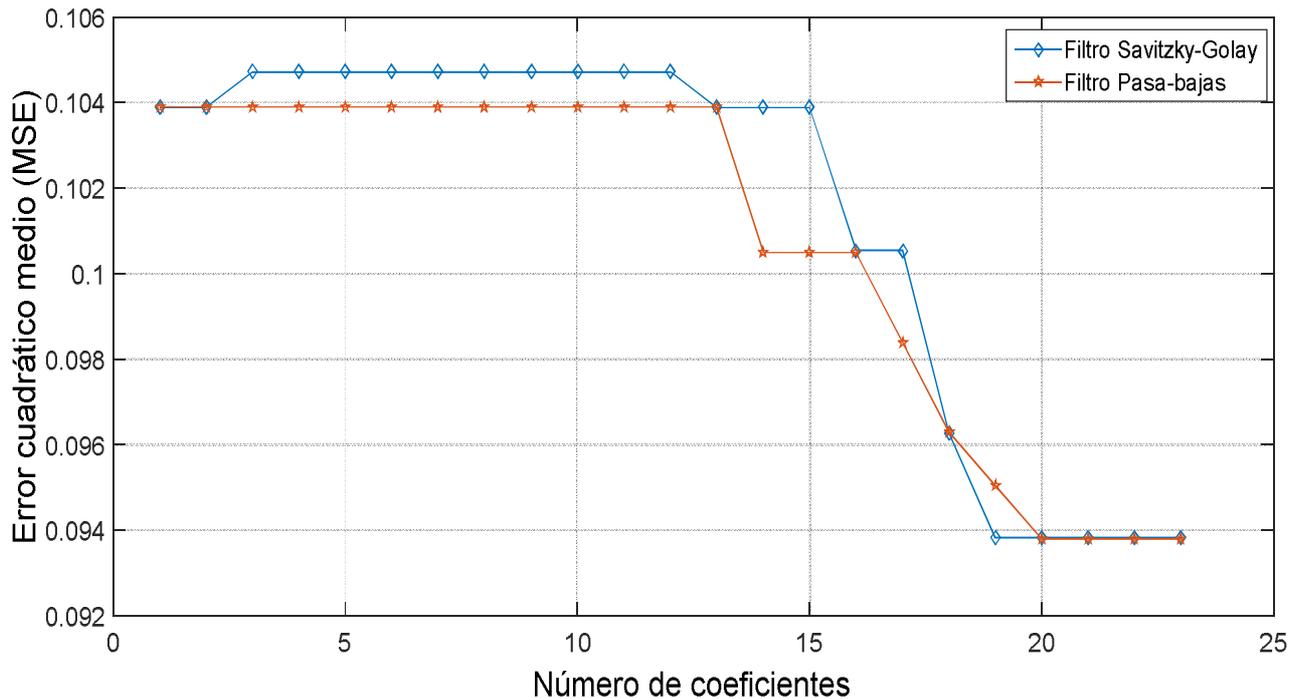


Figura 22: Error cuadrático medio de la señal filtrada con: filtro Savitzky-Golay (color azul) y filtro FIR pasa-bajas (color rojo), utilizando el fotodiodo OP301

## 8. Conclusión

A partir de los experimentos realizados se llega a varias conclusiones. La primera conclusión establece que para ambientes controlados y espectros cercanos entre el rojo y el infrarrojo, el fotodiodo OPT301 ofrece una respuesta satisfactoria de acuerdo a máximo error obtenido de  $0.218^\circ$  se observó que para este fotodiodo no se requiere ningún procesamiento de filtrado digital ya que internamente incluye una etapa de acondicionamiento de la señal para atenuar el ruido generado por el procesamiento de la señal.

La segunda conclusión confirma la hipótesis que le dio origen a este trabajo, es posible emplear fotosensores como la LDR y un LED como transductores en un sistema de OSS en combinación de filtros digitales ya sean Savitzky-Golay, filtro de la media o cualquier filtro pasa-bajas tipo FIR con porcentajes de error menores a 2%.

Finalmente se concluye que el LED azul como fotosensor suprimió las señales generadas por el bulbo automotriz y la lámpara incandescente, lo que brinda una buena opción para que se puedan implementar estos tipos de dispositivos de bajo costo en conjunto con filtros digitales para un sistema OSS. El caso del filtro Savitzky-Golay en conjunto con el LED obtuvo el menor MSE de acuerdo los resultados de la Figura 22, sin embargo, los resultados con el filtro FIR pasa-bajas, aplicando una ventana Hamming también ofrece un error cuadrático medio menor a  $0.5^\circ$  con un filtro de orden 12, lo cual resulta un buen compromiso en cuanto rendimiento del sistema.

Para aplicar el filtro de la media en conjunto con el LED se observó que es necesario considerar el ajuste del umbral para definir el máximo local de acuerdo al tamaño de la ventana del filtro de la media, dado que este filtro atenúa la señal y provoca errores cuando la amplitud de la señal filtrada está por debajo del umbral. Satisfactoriamente, los resultados obtenidos dan lugar al diseño de un OSS capaz de salir a campo para realizar mediciones de coordenadas en 3D en condiciones de ambiente real.

## Trabajos futuros

Como una extensión de este trabajo, en un futuro cercano se realizara un análisis en el ambiente real con el LED en conjunto con los filtros digitales FIR, además la adquisición y procesamiento será implementado en un microprocesador o en una matriz de puertas programables (del inglés, FPGA; Field-Programmable Gate Array).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de Conacyt y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

## Referencias

- Baqersad, Javad, Poozesh, Peyman, Niezrecki, Christopher, & Avitabile, Peter. (2017). Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 86, 17-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.02.011>
- Básaca-Preciado, Luis C., Sergiyenko, Oleg Yu, Rodríguez-Quinonez, Julio C., García, Xochitl, Tyrsa, Vera V., Rivas-Lopez, Moises, . . . Starostenko, Oleg. (2014). Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot. *Optics and Lasers in Engineering*, 54(Supplement C), 159-169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.08.005>
- Brooks, David R., & Mims, Forrest M. (2001). Development of an inexpensive handheld LED-based Sun photometer for the GLOBE program. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 106(D5), 4733-4740. doi: [10.1029/2000JD900545](https://doi.org/10.1029/2000JD900545)
- Burr-Brown, Corporation. (1994). OPT301 Datasheet, PDF - Alldatasheet. from <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Opt301>
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quinonez, J. C., Hernández-Balbuena, D., & Rivera-Castillo, J. (2014). Energy Center Detection in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement. *IEEE Sensors Journal*, 14(7), 2355-2361. doi: [10.1109/JSEN.2014.2310224](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2310224)
- Flores-Fuentes, W., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quinonez, J. C., Rivas-López, M., Hernández-Balbuena, D., Básaca-Preciado, L. C., . . . González-Navarro, F. F. (2016). Optoelectronic scanning system upgrade by energy center localization methods. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 52(6), 592-600. doi: [10.3103/s8756699016060108](https://doi.org/10.3103/s8756699016060108)
- Flores-Fuentes, Wendy, Miranda-Vega, Jesús, Rivas-López, Moisés, Sergiyenko, Oleg, Rodríguez-Quinonez, Julio, & Lindner, Lars. (2018). Comparison between Different Types of Sensors Used in the Real Operational Environment Based on Optical Scanning System. *Sensors*, 18(6), 1684.
- Flores-Fuentes, Wendy, Rivas-Lopez, Moises, Sergiyenko, Oleg, Gonzalez-Navarro, Felix F., Rivera-Castillo, Javier, Hernandez-Balbuena, Daniel, & Rodríguez-Quinonez, Julio C. (2014). Combined application of Power Spectrum Centroid and Support Vector Machines for measurement improvement in Optical Scanning Systems. *Signal Processing*, 98(Supplement C), 37-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.11.008>
- Fridman, L., Weber, S., Greenstadt, R., & Kam, M. (2017). Active Authentication on Mobile Devices via Stylometry, Application Usage, Web Browsing, and GPS Location. *IEEE Systems Journal*, 11(2), 513-521. doi: [10.1109/JSYST.2015.2472579](https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2472579)
- Gander, W.: Hebricek, j. (1997). Smoothing Filters. In Springer (Ed.), *Solving Problems in Scientific Computing Using Maple and MATLAB*.
- González, I.G. (2007). Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios: instalaciones electrotécnicas: Thomson-Paraninfo.
- Lindner, L., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., & Mercorelli, P. (2014, 1-4 June 2014). An approach for dynamic triangulation using servomotors. Paper presented at the 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).
- Lindner, Lars, Sergiyenko, Oleg, Lopez, Moises, Hernandez-Balbuena, Daniel, Flores-Fuentes, Wendy, Rodríguez-Quinonez, Julio, . . . C Basaca, Luis. (2017). Exact laser beam positioning for measurement of vegetation vitality (Vol. 44).
- Lindner, Lars, Sergiyenko, Oleg, Rodríguez-Quinonez, Julio C., Rivas-Lopez, Moises, Hernandez-Balbuena, Daniel, Flores-Fuentes, Wendy, . . . Tyrsa, Vera. (2016). Mobile robot vision system using continuous laser scanning for industrial application. *Industrial Robot: An International Journal*, 43(4), 360-369. doi: [10.1108/IR-01-2016-0048](https://doi.org/10.1108/IR-01-2016-0048)
- McCoy, A. D., Thomsen, B. C., Ibsen, M., & Richardson, D. J. (2004). Filtering effects in a spectrum-sliced WDM system using SOA-based noise reduction. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(2), 680-682. doi: [10.1109/LPT.2003.821077](https://doi.org/10.1109/LPT.2003.821077)
- Miranda-Vega, Jesús Elías, Flores-Fuentes, Wendy, Sergiyenko, Oleg, Rivas-López, Moisés, Lindner, Lars, Rodríguez-Quinonez, Julio C., & Hernández-Balbuena, Daniel. (2018). Optical cyber-physical system embedded on an FPGA for 3D measurement in structural health monitoring tasks. *Microprocessors and Microsystems*, 56, 121-133. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.11.005>
- Pollard, Evangeline, & Gingras, Denis. (2012, 2012-12-05). Improved Low Cost GPS Localization By Using Communicative Vehicles. Paper presented at the 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV, Guangzhou, China.
- Rivera-Castillo, Javier, Flores-Fuentes, Wendy, Rivas-López, Moisés, Sergiyenko, Oleg, Gonzalez-Navarro, Felix F., Rodríguez-Quinonez, Julio C., . . . Básaca-Preciado, Luis C. (2017). Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(10), e1967-n/a. doi: [10.1002/stc.1967](https://doi.org/10.1002/stc.1967)
- Rodríguez-Quinonez, J. C., Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Rivas-lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., Rascón, R., & Mercorelli, P. (2017). Improve a 3D distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods' approach. *Opto-Electronics Review*, 25(1), 24-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2017.03.001>
- Rodríguez-Quinonez, J. C., Sergiyenko, O., Hernandez-Balbuena, D., Rivas-Lopez, M., Flores-Fuentes, W., & Basaca-Preciado, L. C. (2014). Improve 3D laser scanner measurements accuracy using a FFBP neural network with Widrow-Hoff weight/bias learning function. *Opto-Electronics Review*, 22(4), 224-235. doi: [10.2478/s11772-014-0203-1](https://doi.org/10.2478/s11772-014-0203-1)
- Savitzky, Abraham, & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627-1639. doi: [10.1021/ac60214a047](https://doi.org/10.1021/ac60214a047)
- Savory, Seb J. (2008). Digital filters for coherent optical receivers. *Optics Express*, 16(2), 804-817. doi: [10.1364/OE.16.000804](https://doi.org/10.1364/OE.16.000804)
- Sergiyenko, O., & Rodriguez-Quinonez, J.C. (2016). Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision. Hershey, PA, USA: IGI Global.
- Sergiyenko, O. Yu, Ivanov, M. V., Tyrsa, V. V., Kartashov, V. M., Rivas-López, M., Hernández-Balbuena, D., . . . Tchernykh, A. (2016). Data transferring model determination in robotic group. *Robotics and Autonomous Systems*, 83, 251-260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.04.003>
- Sergiyenko, Oleg, Tyrsa, Vira, Lopez, Moisés Rivas, Balbuena, Daniel Hernandez, Quinonez, Julio César Rodríguez, Preciado, Luis Carlos Basaca, & Fuentes, Wendy Flores. (2016). MX 344504 B.
- Shan, J., & Toth, C.K. (2018). Introduction to laser ranging, profiling, and scanning. In *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, Second Edition: CRC Press.
- Singh, V.P., Singh, S., Prasad, S.M., & Parihar, P. (2017). *UV-B Radiation: From Environmental Stressor to Regulator of Plant Growth*: Wiley.
- Smith, Steven W. (1999). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*: California Technical Publishing.
- Sohn, Hoon, Czarnecki, Jerry A, & Farrar, Charles R. (2000). Structural health monitoring using statistical process control. *Journal of structural engineering*, 126(11), 1356-1363.
- Steger, C., Ulrich, M., & Wiedemann, C. (2018). *Machine Vision Algorithms and Applications*: Wiley.
- Su, Jing-Jing, Gao, Yi-Tian, & Jia, Shu-Liang. (2017). Solitons for a generalized sixth-order variable-coefficient nonlinear Schrödinger equation for the attosecond pulses in an optical fiber. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 50, 128-141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.01.028>