

Reporte de Investigación

Validación del Método de Medición de un Visibilímetro Provisto de un Convertidor Universal de Frecuencia a Código Digital

M. en C. Raymundo Barrales Guadarrama
M. en C. Melitón Ezequiel Rodríguez Rodríguez
Dr. Víctor Rogelio Barrales Guadarrama
Dr. Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
Departamento de Electrónica
Grupo de Sensores y Señales

Dr. Antonio Mocholí Salcedo

Universidad Politécnica de Valencia
Departamento de Ingeniería Electrónica
Grupo de Sistemas de Control de Tráfico

REPORTE DE INVESTIGACIÓN

**VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE
MEDICIÓN DE UN VISIBILÍMETRO
PROVISTO DE UN CONVERTIDOR UNIVERSAL
DE FRECUENCIA A CÓDIGO DIGITAL**

Universidad
Autónoma
Metropolitana



Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

REPORTE DE INVESTIGACIÓN

VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE UN VISIBILÍMETRO PROVISTO DE UN CONVERTIDOR UNIVERSAL DE FRECUENCIA A CÓDIGO DIGITAL

M. en C. Raymundo Barrales Guadarrama
M. en C. Melitón Ezequiel Rodríguez Rodríguez
Dr. Víctor Rogelio Barrales Guadarrama
Dr. Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón

Universidad Autónoma Metropolitana—Azcapotzalco
Departamento de Electrónica
Área de Sensores y Procesamiento de Señales

Dr. Antonio Mocholí Salcedo

Universidad Politécnica de Valencia
Departamento de Ingeniería Electrónica
Grupo de Sistemas de Control de Tráfico

**Universidad
Autónoma
Metropolitana**



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

Rector General
Salvador Vega y León

Secretario General
M. en C. Q. Norberto Manjarrez Álvarez

Coordinador General de Difusión
Carlos Ortega Guerrero

Director de Publicaciones y Promoción Editorial
Bernardo Ruiz

Subdirectora de Publicaciones
Laura González Durán

Subdirector de Distribución y promoción editorial
Marco Moctezuma

UNIDAD AZCAPOTZALCO

Rector
Romualdo López Zárate

Secretario
Abelardo González Aragón

Director de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Luis Enrique Noreña Franco

Secretaria Académica
Ma. de Lourdes Delgado Nuñez

Jefe del Departamento de Electrónica
Mtro. Roberto Alfonso Alcántara Ramírez

Presidente del Consejo Editorial de la División de CBI
Alejandro León Galicia

Presidente del Comité Editorial de la División de CBI
Lucio Vazquez Briseño

Jefa de la Oficina de Producción Editorial y Difusión de Eventos de la División de CBI
Rosa Ma. Benítez Mendoza

Validación del Método de Medición de un Visibilímetro Provisto de un Convertidor Universal de Frecuencia a Código Digital
Primera edición 2013

Distribución interna

ISBN: 978-607-28-0108-0

Diseño Gráfico: Juan Manuel Galindo Medina

D.R. © 2013, Universidad Autónoma Metropolitana
Prolongación Canal de Miramontes 3855, Ex Hacienda San Juan de Dios, Delegación Tlalpan 14387 México, D.F.

D.R. © 2013 Raymundo Barrales Guadarrama, Melitón Ezequiel Rodríguez Rodríguez, Víctor Rogelio Barrales Guadarrama, Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón, Antonio Mocholí Salcedo

Unidad Azcapotzalco / División de Ciencias Básicas e Ingeniería / Departamento de Ciencias Básicas
Tel. (55) 5318 9011 - 9012, Fax (55) 5394 7385

Esta publicación no puede ser reproducida, ni en todo ni en parte, ni registrada o transmitida, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma y por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo y por escrito, de los editores.

Impreso en México / Printed in Mexico

Este material fue dictaminado y aprobado para su publicación por el Comité Editorial de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco en su sesión del día 18 de septiembre del año 2012.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Resumen	9
2. Antecedentes	11
3. Propósito del reporte de investigación	13
4. Principios de operación del visibilímetro	15
4.1 El principio de medición de la dispersión directa	15
4.2 Principio de diseño del visibilímetro	16
4.3 Supresión de la luz ambiental de interferencia	17
5. Materiales y método para obtener la frecuencia de señal en función de la irradiancia	19
6. Resultados experimentales de la característica $f[Hz] = g(E [\mu W/cm^2])$	21
7. Materiales y método para obtener la responsividad del sensor en función de la longitud de onda detectada	23
8. Resultados experimentales de la característica $R = f(\lambda)$	25
9. Búsqueda de la solución material para el nuevo sistema óptico del visibilímetro	27
10. Resultados experimentales de la respuesta del fotodiodo cuasi-digital provisto del filtro pasabanda de interferencia	29
11. Materiales y método para comprobar el sistema óptico final del visibilímetro	31
12. Resultados sobre la solución material propuesta	33
13. Conclusiones	35
14. Referencias	37

1. RESUMEN

La contribución del Área de Sensores y Procesamiento de Señales (UAM-Azcapotzalco, México) y del Grupo de Sistemas de Control de Tráfico (UPV, Valencia, España) en el desarrollo de instrumentos de monitorización medioambiental que utilizan el nuevo paradigma de la adquisición de datos a través de un convertidor de frecuencia a código digital, en lugar del paradigma convencional del convertidor analógico-digital, se ha visto materializada con el diseño de un visibilímetro para aplicaciones de tráfico terrestre. Debido, justamente, a la adopción de este nuevo paradigma, el sistema óptico de captación de la señal, necesaria para estimar la visibilidad espacial en condiciones meteorológicas adversas (niebla, lluvia intensa, nieve, etc.), ha debido diseñarse para rechazar ópticamente las interferencias lumínicas, ya que la supresión electrónica convencional de estas interferencias no tiene sentido con el nuevo método de adquisición de datos. En consecuencia, se ha hecho necesario caracterizar el sistema óptico de captación del visibilímetro antes de considerar la caracterización total del instrumento. En este informe, se presenta la caracterización del sensor del visibilímetro que ha consistido en obtener: a) la respuesta experimental del sensor en función de la irradiancia recibida para diferentes valores de su longitud de onda, b) la responsividad o sensibilidad experimental del sensor en función de la longitud de onda de la irradiancia recibida y c) la solución material adoptada para rechazar las interferencias lumínicas a partir del análisis de los resultados experimentales.

2. ANTECEDENTES

3. PROPÓSITO DEL

REPORTE DE INVESTIGACIÓN

Se ha puesto de manifiesto la importancia de monitorizar las condiciones del clima en las autovías como medida para reunir información decisiva en el control del tráfico vehicular terrestre [1]. Las condiciones adversas del clima que inciden en la buena circulación del tráfico de vehículos llegan a tener consecuencias fatales. Es el caso cuando una pobre visibilidad, causada por la aparición de niebla o la intensa precipitación de nieve o lluvia, da lugar a accidentes sobre la autovía o, por decir lo menos, atascos vehiculares de varias horas. Los accidentes imputables a las condiciones medioambientales pueden prevenirse al controlar el tráfico terrestre (avisos de uso de vías alternas, cierre de vías peligrosas, contingencias de prevención, etc.), lo cual se puede lograr con un sistema de información del estado presente del clima.

El Área de Sensores y Procesamiento de Señales (ÁSPS) adscrita al Departamento de Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana—Azcapotzalco, en colaboración con el Grupo de Control de Tráfico adscrito al Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Valencia, ha venido desarrollando instrumentación meteorológica orientada a la monitorización medioambiental en autovías cuya información pueda utilizarse en un Sistema Inteligente de Transporte (ITS¹) regional con el propósito de controlar el tráfico de automóviles en un evento de clima severo. Uno de los instrumentos en desarrollo es un visibilímetro con base en un convertidor universal de frecuencia a código digital (UFDC²).

Un visibilímetro es un instrumento capaz de medir la visibilidad espacial en condiciones de niebla, nieve o lluvia intensa. La medición de este parámetro se ve afectada por factores subjetivos y físicos, ya que está basada en la estimación que puede hacer un observador humano de la visibilidad de un objeto a una distancia donde las condiciones de la atmósfera pueden disminuir la percepción visual del objeto. La cantidad meteorológica esencial, que es la transparencia de la atmósfera, puede medirse objetivamente y está representada por el Rango Óptico Meteorológico (ROM), cuya definición, unidades y requerimientos meteorológicos ya han sido reportados [1].

¹ En la literatura respectiva, este acrónimo está muy extendido y son las singlas en inglés de "Intelligent Transport Systems".

² Se utilizará en este documento el acrónimo UFDC que denota las siglas en inglés de "Universal Frequency-to-Digital Converter".

3. PROPÓSITO DEL REPORTE DE INVESTIGACIÓN

En reportes de investigación anteriores [1], [2], se ha descrito el desarrollo de visibilímetros que miden el coeficiente de extinción, que es una cantidad relacionada con la disminución de la intensidad luminosa de una fuente de luz debida a la dispersión de ésta cuando incide a través de un aerosol, por medio de la técnica de la retrodispersión. El coeficiente de extinción se utiliza entonces para estimar la visibilidad [3].

Sin embargo, la técnica de la retrodispersión tiene inconvenientes. Quizá el más importante de éstos, consiste en que los modelos matemáticos que relacionan el coeficiente de extinción con el ROM se han obtenido estadísticamente, en regiones del planeta diversas y, consecuentemente, estos modelos, aunque similares, no son únicos [4], [5].

La teoría de Mie [6] que ha estudiado los modelos de comportamiento de la dispersión de la luz por partículas pequeñas (del orden de nanómetros) y el trabajo de Winstanley et al. [7] que ha validado una relación lineal entre el coeficiente de extinción y la intensidad luminosa de la dispersión de luz por partículas pequeñas cuando ésta se detecta por medición directa, así como la validación de visibilímetros de dispersión directa que utilizan el modelo de Winstanley [8], han orientado los trabajos de diseño de un visibilímetro de dispersión directa por parte del ÁSPS. De hecho, este tipo de visibilímetros se pueden encontrar en el comercio [9], [10], [11], etc., pero la investigación se ha centrado en el diseño de uno de estos instrumentos bajo un paradigma nuevo en el sistema de adquisición de datos.

El presente documento describe brevemente la contribución al estado del arte en el diseño de visibilímetros que propone el ÁSPS y su propósito principal consiste en reportar el trabajo de validación de la técnica de medición de la intensidad luminosa para la obtención del coeficiente de extinción y, por lo tanto, de la estimación de la visibilidad, que se adapta al uso del nuevo paradigma en el sistema de adquisición de datos propuesto.

4. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL VISIBILÍMETRO

4.1 El principio de medición de la dispersión directa

Los sensores de visibilidad determinan el ROM por medio de la medición del coeficiente de extinción, el cual se supone constante alrededor del sensor. Esta medición permite calcular un índice equivalente al del observador humano de la visibilidad. A mediados de los años 70 del siglo pasado, los investigadores proponían ya el principio de la "dispersión directa" como método para la medición del coeficiente de extinción, un parámetro proporcional a la reducción del flujo luminoso y, por lo tanto, de la visibilidad. Pocos artículos reportan resultados tecnológicos al respecto [8], [12].

La visibilidad se determina a partir del coeficiente de extinción σ , definido como:

$$\frac{\partial E}{\partial l} = -\sigma E \quad (1)$$

Donde E es la intensidad de la luz en la posición l. Resolviendo (1), la fracción de la luz transmitida desde una fuente de luz a una distancia l, está dada por:

$$\frac{E(l)}{E(0)} = e^{-\sigma l} \quad (2)$$

La longitud a la cual la intensidad luminosa se reduce a un 5% de su máximo, puede encontrarse mediante la ley de Koschmieder:

$$ROM = \frac{2.996}{\sigma} \quad (3)$$

La visibilidad se puede medir utilizando instrumentos ópticos para detectar la dispersión luminosa.

La Fig. 1 muestra el principio básico de uno de estos instrumentos.

En el esquema de la Fig. 1, un emisor genera un haz de luz y la dispersión de este haz, debida a algún aerosol en la atmósfera, se recibe dentro de un ángulo θ por un detector óptico semiconductor. Una señal de salida alta en el detector correspondería a una intensidad alta de luz dispersada y, entonces, se mediría una baja visibilidad.

Cuando $\theta \leq 90^\circ$, se dice que el instrumento es del tipo de dispersión directa. Los sensores de visibilidad por dispersión directa, disponibles en el mercado, utilizan LEDs infrarrojos como fuentes de luz. Algunos estudios han reportado la relación teórica entre el coeficiente de extinción σ y la intensidad luminosa dispersada $E(\theta)$. Se ha demostrado [7], [8] que el coeficiente de extinción depende de la distribución del tamaño de la partícula que modela la muestra de niebla y del ángulo de dispersión; sin embargo, para rangos $\theta \in [30^\circ, 40^\circ]$ [7] o $\theta \in [20^\circ, 50^\circ]$ [8], esta dependencia es mínima y σ es casi proporcional a $E(\theta)$. Una alta correlación lineal entre σ y $E(\theta)$ se observa para el ángulo $\theta=35^\circ$ [7] o $\theta=40^\circ$ [8]. Por lo tanto, para un rango de θ conveniente, la siguiente relación es válida:

$$\sigma = k(\theta) \quad (4)$$

La visibilidad se calcula después aplicando (3).

4.2 Principio de diseño del visibilímetro

Los entornos ITS exigen que la instrumentación medioambiental utilizada para el control de tráfico sea instalada a lo largo de las autovías y, por lo tanto, que la solución material adoptada consuma poca potencia y se recurra a la telemedición. Por otro lado, la innovación en el diseño de un visibilímetro para un entorno ITS, se ha encontrado en el uso de un UFDC como órgano de adquisición de datos. El UFDC va a simplificar la complejidad del sistema de adquisición de datos, ya que la interconexión del sensor de luz, Fig. 1, al UFDC y al órgano de control y cálculo (microcontrolador) es directa, a diferencia de un ADC convencional que requiere un acondicionador frontal de la señal del sensor, antes de la conversión numérica.

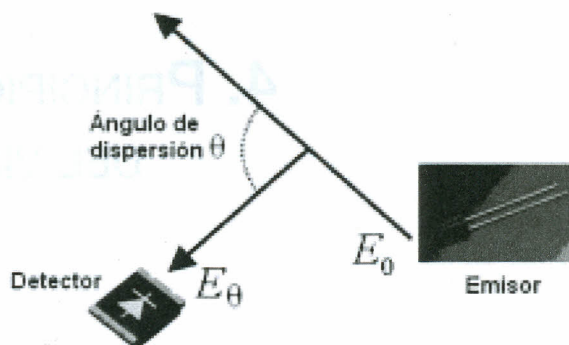


Fig. 1. Esquema del principio de medición de la intensidad luminosa por dispersión directa.

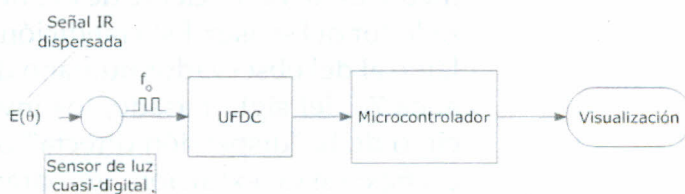


Fig. 2. Esquema de diseño del visibilímetro.

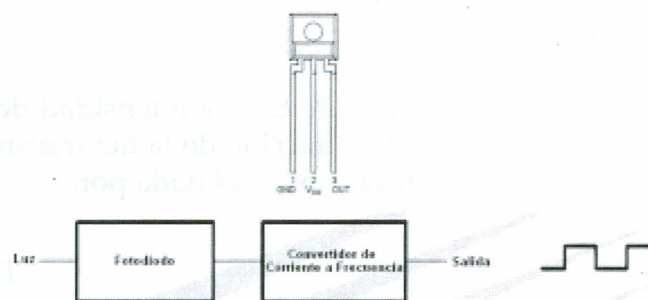


Fig. 3. Diagrama a bloques del sensor de luz cuasi-digital.

No es el propósito en este reporte mencionar las bondades de un UFDC. En la literatura sobre el tema [13], [14], [15] se puede consultar el avance que la metrología ha tenido en los últimos 10 años debido a la aplicación del UFDC como nuevo paradigma en los sistemas de adquisición de datos.

La simplificación en la interconexión entre el sensor y su órgano de control y cálculo en un instrumento con una conversión numérica a cargo de un UFDC, es posible debido al uso de la nueva generación de sensores llamados cuasi-digitales. Estos sensores, a diferencia de sus contrapartes analógicas, no generan un voltaje proporcional a la variación de la energía que éstos son capaces de captar. En cambio, generan una señal TTL con una frecuencia proporcional, de modo que un UFDC, provisto de un contador de frecuencia especializado y un conversor de la cuenta digital a un código de representación digital estándar, se interconecte directamente a un microcontrolador o cualquier otro órgano de control y cálculo digital. La Fig. 2 muestra un diagrama a bloques del diseño del visibilímetro con base en un UFDC.

Sensor de luz cuasi-digital. El sensor que capta la intensidad luminosa dispersada por partículas suspendidas en la atmósfera y, que en nuestro caso se trataría de gotitas de agua en suspensión o niebla, consiste de un fotodiodo y un convertidor de corriente a frecuencia integrados, como lo muestra la Fig. 3. El rango de la irradiancia que es capaz de captar este sensor es de 0.001 a 1 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ con una respuesta pico de 940 nm.

Fuente de luz. La fuente de luz del visibilímetro es un LED IR de GaAs con un flujo de radiación de 40 mW y una longitud de onda de 950 nm. Puesto que la distancia de la punta del lente del LED IR al detector no se especifica en la curva del patrón de radiación del componente dada por el fabricante, se ha debido añadir un lente plano-convexo de 25 mm de diámetro a fin obtener un haz IR colimado y restringir así la muestra de niebla que se radia.

Sistema óptico del sensor. La fuente de luz y el sensor óptico se colocan de manera a tener un ángulo $\theta = 40^\circ$, en la disposición geométrica indicada en la Fig. 1. La Fig. 4 muestra un esquema mecánico del sistema óptico implementado.

UFDC. El convertidor universal de frecuencia a código digital integra un contador de frecuencia basado en el método de la cuenta dependiente [13] y un convertidor de la cuenta digital a códigos de representación numérica digital estándar (ASCII, BCD, Gray, etc.). De esta manera, la conversión

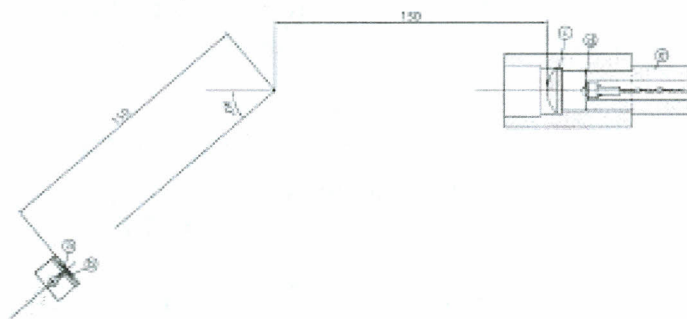


Fig. 4. Dibujo mecánico del sistema óptico del visibilímetro. a. Sensor cuasi-digital; b. Cubierta de protección; c. Lente plano-convexo $\Phi = 25$ mm; d. LED IR; e. Montura ajustable del lente. Las dimensiones están en mm.

numérica es inmediata y el UFDC permite una interconexión directa al microcontrolador.

Microcontrolador y visualización. Evidentemente, el ADC integrado al microcontrolador no es más necesario y se ha de seleccionar un microcontrolador de arquitectura más simple, sin ADC integrado, para las labores de control y cálculo en el instrumento.

4.3 Supresión de la luz ambiental de interferencia

En general, en los sistemas de fotodetección, el espectro de las señales de luz y el espectro de la luz ambiente de interferencia están localizados de manera determinista en el dominio de la frecuencia y sus representaciones eléctricas están presentes a la salida de un amplificador de transimpedancia. Estas señales son relativamente fáciles de separar cuando son procesadas por filtros de primero o segundo orden. Sin embargo, no es este el caso en el diseño del visibilímetro que se propone.

La función de transferencia característica del sensor cuasi-digital es [16]:

$$f = kE + f_D \quad (5)$$

Donde f es la salida en frecuencia del sensor, k es la responsividad del sensor, E es la irradiancia y

f_D es la frecuencia del sensor en la oscuridad. Típicamente, f_D es muy pequeña (0.4 Hz) y puede despreciarse. Por lo tanto, (5) se puede escribir:

$$f \approx kE \quad (6)$$

Por otro lado, el fabricante del fotodiodo cuasi-digital reporta la curva característica de transferencia de éste, Ec. (5), para una longitud de onda en particular $\lambda_p = 940$ nm, como lo muestra la Fig. 5.

Es de suponer entonces que, al exponer el sensor al ambiente, la respuesta de éste cambie dinámicamente, de acuerdo al amplio espectro de longitudes de onda que contiene la luz ambiental, es decir, el fotodiodo generará una señal de frecuencia por cada cantidad de irradiancia recibida a una determinada longitud de onda:

$$\begin{aligned} f_{\lambda 0} &= k_0 E \\ f_{\lambda 1} &= k_1 E \\ f_{\lambda 2} &= k_2 E \\ &\bullet \\ &\bullet \\ &\bullet \\ f_{\lambda 940} &= k_{940} E \\ &\bullet \\ &\bullet \\ f_{\lambda 950} &= k_{950} E \\ &\bullet \\ &\bullet \end{aligned} \quad (7)$$

De (7) está claro que sólo interesa procesar la señal de irradiancia E_s recibida a la longitud de onda del LED I_R del visibilímetro $\lambda = 950$ nm. Como se ha mencionado anteriormente, el filtro necesario para obtener la señal de interés ha de ser un filtro óptico.

Antes de proponer una solución material para obtener la señal de frecuencia de interés, es necesario caracterizar el sistema óptico del visibilímetro que se ha presentado en la Fig. 4. Concretamente,

se ha propuesto llevar a cabo los siguientes estudios:

a) *Obtención de la característica de la frecuencia en función de la irradiancia* $f [\text{Hz}] = g(E [\mu\text{W}/\text{cm}^2])$. Es necesario investigar la dependencia de la salida en frecuencia del sensor cuasi-digital con relación al rango de longitudes de onda que el sensor es capaz de captar. Si, como podría esperarse, la respuesta del sensor depende de la longitud de onda recibida, será necesario añadir al sistema óptico componentes que permitan restringir la respuesta del sensor a una sola longitud de onda de trabajo o, por lo menos, a un rango estrecho de longitudes de onda alrededor de la longitud de onda de trabajo.

b) *Obtención de la responsividad del sensor en función de la longitud de onda* $R = f(\lambda)$. Las características de los componentes ópticos adicionales para restringir la respuesta del sensor cuasi-digital estarán especificadas con base en el valor de la longitud de onda que determina su máxima responsividad y, entonces, se ha de investigar también la responsividad del sensor en función de la variación de la longitud de onda recibida.

c) *Validación de la solución material*. Una vez seleccionada la solución material, el nuevo sistema óptico del sensor se ha de validar a fin de comprobar su eficacia.

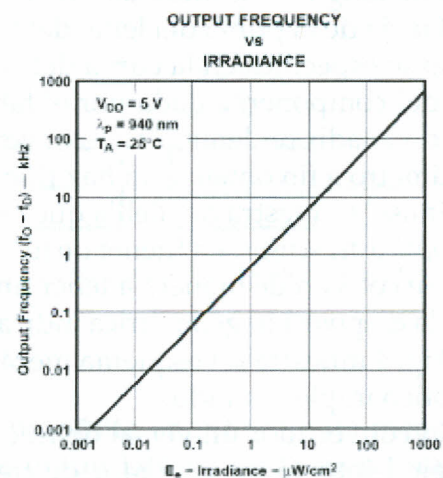


Fig. 5. Gráfica de la curva característica de transferencia del fotodiodo casi-digital para $\lambda_p = 940$ nm, reportada por el fabricante [16].

5. MATERIALES Y MÉTODO PARA OBTENER LA FRECUENCIA DE SEÑAL EN FUNCIÓN DE LA IRRADIANCIA

Se investigó, en primer lugar, la respuesta del sensor para una fuente de intensidad variable a diferentes longitudes de onda. El intervalo de longitudes de onda a explorar se ha obtenido de la respuesta espectral del diodo reportada por el fabricante [16] y que se muestra en la Fig. 6. El espectro experimental explorado fue $\lambda \in [800, 1100]$ nm. Se ha hecho una aproximación manual del valor de la longitud de onda que se tiene para la máxima respuesta y se ha encontrado que $R(912 \text{ [nm]}) = 1$. Está claro que el sensor puede tener una respuesta significativa para haces incidentes con longitudes de onda en el intervalo aproximado [880 nm, 980 nm].

La respuesta del sensor se obtuvo mediante el montaje experimental ilustrado en la Fig. 7.

- Un monocromador Spex 270M se utiliza para separar un haz de luz blanca en haces de diferentes longitudes de onda. El equipo usado permite fijar la longitud de onda a voluntad.
- El variac permite variar la intensidad de la fuente luminosa.

$$E [\mu W/cm^2] = f(V_{RMS} [V])$$

- El medidor óptico, marca Newport, modelo 1835-C, permite obtener una relación entre la intensidad de luz emitida por el monocromador y el voltaje del variac:

$$f [Hz] = g(E [\mu W/cm^2]) = h(V_{RMS} [V])$$

Después, se coloca el fotodiodo cuasi-digital, se varía la intensidad con el variac y se registra la frecuencia de salida del sensor, de acuerdo al montaje experimental de la Fig. 8.

Las Figs. 9 y 10 muestran imágenes del montaje experimental.

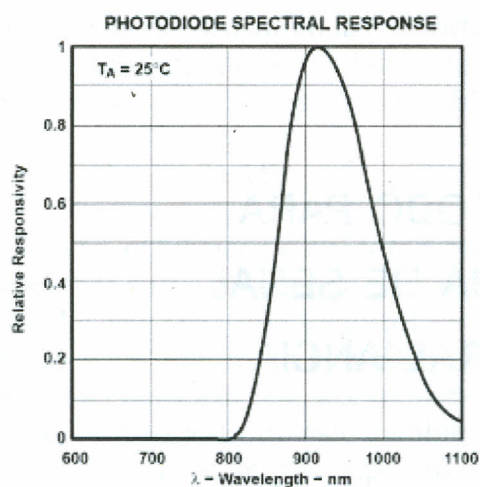


Fig. 6. Gráfica de la respuesta espectral del fotodiodo cuasi-digital utilizado en el visibilímetro, Tomado de [16].

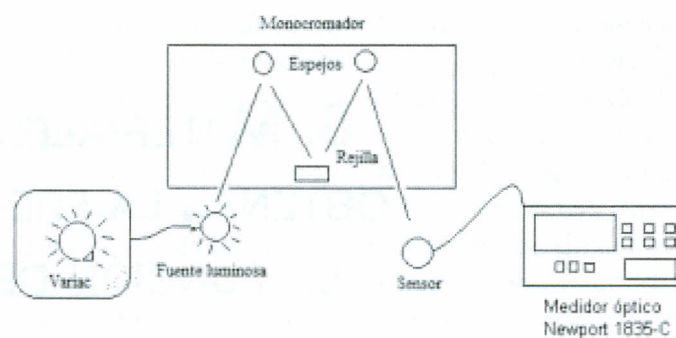


Fig. 7. Dibujo conceptual del montaje experimental utilizado para calibrar la intensidad luminosa en función del voltaje del variac.

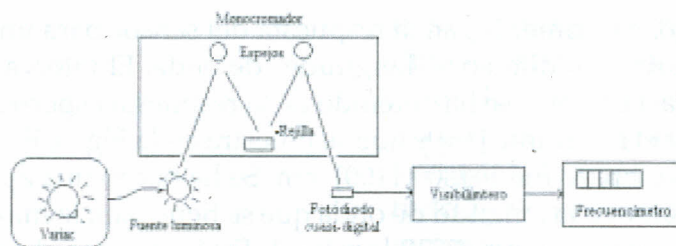


Fig. 8. Dibujo conceptual del montaje experimental utilizado para obtener la respuesta del fotodiodo cuasi-digital en función de la longitud de onda.

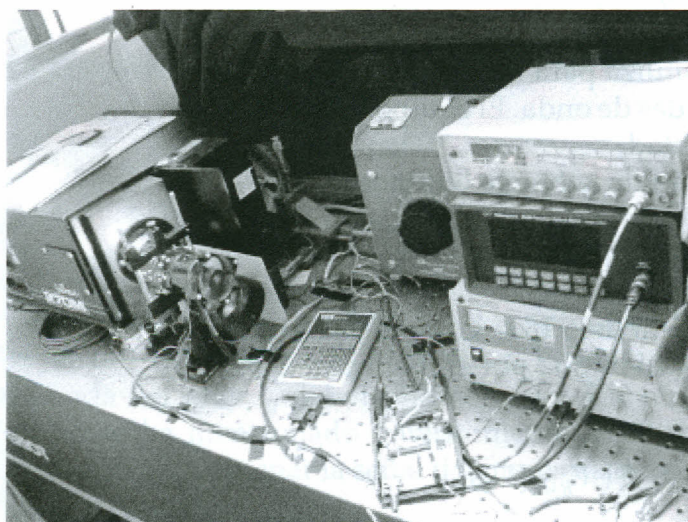


Fig. 9. Fotografía de los montajes experimentales para obtener la respuesta del fotodiodo cuasi-digital en función de la longitud de onda.

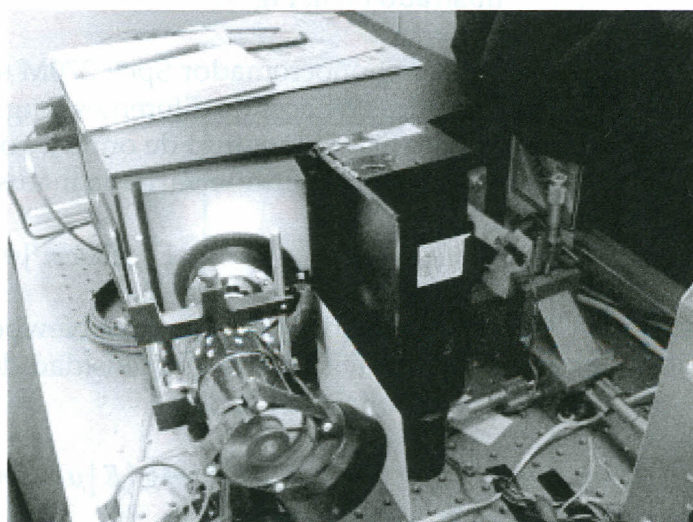


Fig. 10. Fotografía del montaje detallado del monocromador.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CARACTERÍSTICA $f [Hz] = g (E [\mu W/cm^2])$

Las figuras 11, 12 y 13 muestran la respuesta del sensor cuasi-digital en función de la intensidad luminosa recibida y para el rango de longitudes de onda $\lambda \in [800, 1100] nm$.

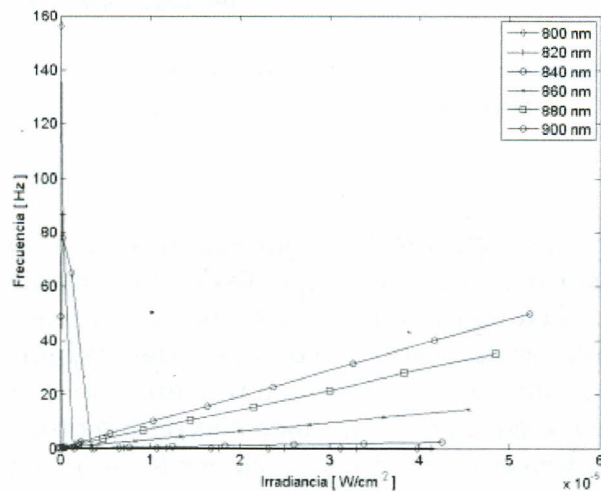


Fig. 11. Gráfica de la respuesta del sensor para el intervalo de longitudes de onda [800 nm, 900 nm].

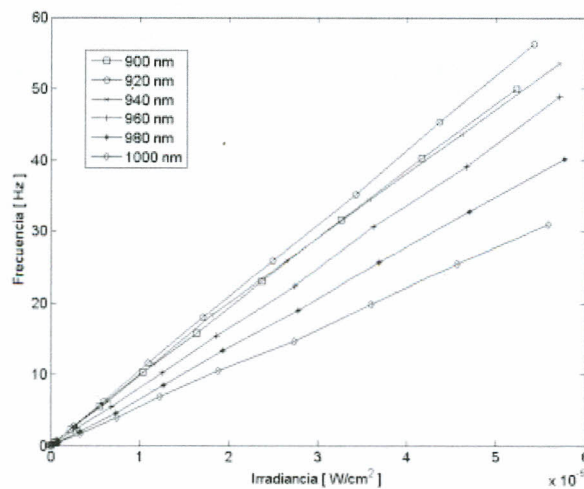


Fig. 12. Gráfica de la respuesta del sensor para el intervalo de longitudes de onda [900 nm, 1000 nm].

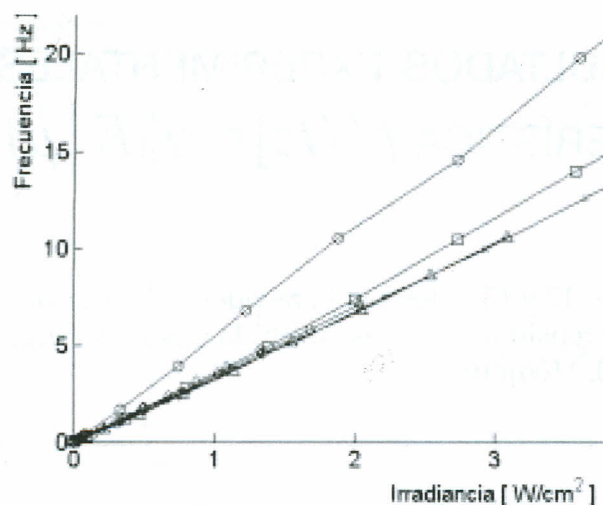


Fig. 13 Gráfica de la respuesta del sensor para el intervalo de longitudes de onda [1000 nm, 1100 nm].

Primera discusión. Este resultado indica, más claramente, que la salida del sensor depende no solamente de la intensidad luminosa recibida sino de la longitud de onda a la cual esta intensidad es emitida. Por lo tanto, es necesario que el sensor del visibilímetro reciba una intensidad luminosa dispersada a una única longitud de onda o, cuando menos, en un espectro estrecho de longitudes de onda. Es necesario entonces obtener las funciones $R = f(\lambda)$ como se había previsto.

7. MATERIALES Y MÉTODO PARA OBTENER LA RESPONSIVIDAD DEL SENSOR EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA DETECTADA

Puesto que no se hace uso de un procesador analógico frontal para la supresión electrónica de las interferencias, ha de garantizarse la detección de un ancho de banda espectral muy estrecho que tenga como longitud de onda central aquella para la cual el sensor responde con máxima sensibilidad.

No se ha querido utilizar la respuesta del sensor reportada por el fabricante, Fig. 6, para encontrar la longitud de onda a la cual se obtiene la máxima responsividad del sensor porque se ha querido confiar en tener un dato avalado experimentalmente.

No es necesario un nuevo montaje experimental para obtener las respuestas $R=f(\lambda)$, ya que éstas están implícitas en el conjunto de datos del experimento anterior. Ahora simplemente se relacionarán las longitudes de onda con las frecuencias de respuesta del sensor para cada una de las intensidades de luz ajustadas en el monocromador.

8. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CARACTERÍSTICA $R=f(\lambda)$

El resultado de la exploración de la responsividad del sensor cuasi-digital se muestra en la Fig. 14. (Se han utilizado los voltajes del variac que corresponden a las distintas intensidades luminosas).

Segunda discusión. Es de notar, tal como se esperaba, que a diferentes intensidades, existe un solo valor de responsividad máxima. Este valor es $\lambda = 920$ nm (diferente a 912 nm según la localización de la máxima responsividad sobre la característica del fabricante).

Este resultado confirma que es necesario añadir al sistema óptico presente del visibilímetro un componente que restrinja el ancho de banda de las longitudes de onda recibidas alrededor de $\lambda = 920$ nm, para así obtener máxima responsividad.

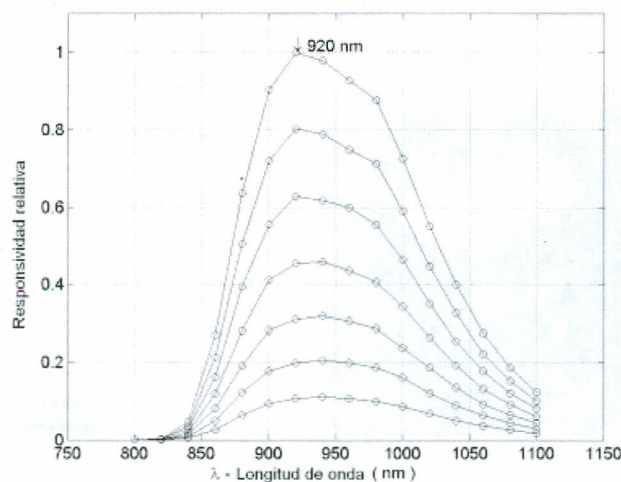


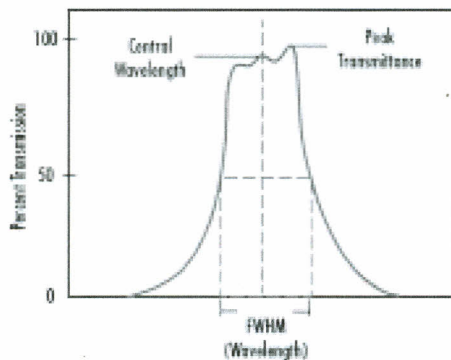
Fig. 14. Gráficas de la responsividad del sensor a diferentes longitudes de onda.

9. BÚSQUEDA DE LA SOLUCIÓN MATERIAL PARA EL NUEVO SISTEMA ÓPTICO DEL VISIBILÍMETRO

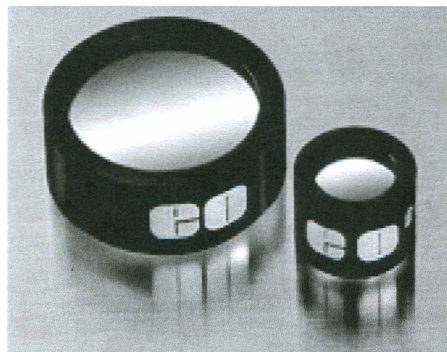
La responsividad del sensor cuasi-digital es máxima para $\lambda = 920$ nm; sin embargo, el LED IR utilizado como fuente luminosa emite a $\lambda_{LEDIR} = 950$ nm. A esta longitud de onda, aún se está muy cerca de la máxima responsividad del sensor (> 0.9), por lo cual se ha de buscar una solución material para bloquear las intensidades de luz con una longitud diferente a 950 nm. Se ha pensado en dos soluciones que no necesariamente son únicas:

- Utilizar un filtro pasabanda de interferencia ("Bandpass Interference Filter"), que son filtros NIR con una frecuencia central y un ancho de banda estrecho (10-30 nm).
- Utilizar un filtro de muesca sintonizable ("Tunable Top Notch Filter").

La solución más sencilla y menos costosa es adaptar al montaje del fotodiodo cuasi-digital un filtro pasabanda de interferencia (FPI). De acuerdo a la respuesta experimental del fotodiodo, se ha seleccionado el filtro NT67-795 de la compañía Edmund Optics [17], con una longitud de onda central de 950 nm, un ancho de banda de 10 nm y un diámetro de 12.5 mm. La Fig. 15 a) muestra la respuesta típica del filtro y la Fig. 15 b) el aspecto de éste.



a)



b)

Fig. 15. a) Gráfica de la respuesta típica del filtro pasabanda de interferencia;
b) Fotografía del aspecto físico del filtro. Tomado de [18].

10. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA RESPUESTA DEL FOTODIODO CUASI-DIGITAL PROVISTO DEL FILTRO PASABANDA DE INTERFERENCIA

El montaje de la Fig. 7 y la técnica asociada descrita para este experimento vuelven a utilizarse para obtener la respuesta del fotodiodo cuasi-digital provisto del FPI. En este nuevo experimento, se obtuvo la respuesta del sensor para un barrido en el intervalo $\lambda \in [940 \text{ nm}, 960 \text{ nm}]$. La Fig. 16 muestra el resultado.

Tercera discusión. Las gráficas de la Fig. 16 demuestran que el FPI NT67-795 adaptado a la montura del fotodiodo cuasi-digital, restringe la captación de luz alrededor de la longitud de onda de interés ($\lambda = 950 \text{ nm}$) con una tolerancia de $\pm 5 \text{ nm}$ como se esperaba. El espectro de luz pasante permitirá entonces obtener, con un error de $\pm 0.5\%$, la señal de frecuencia de interés.

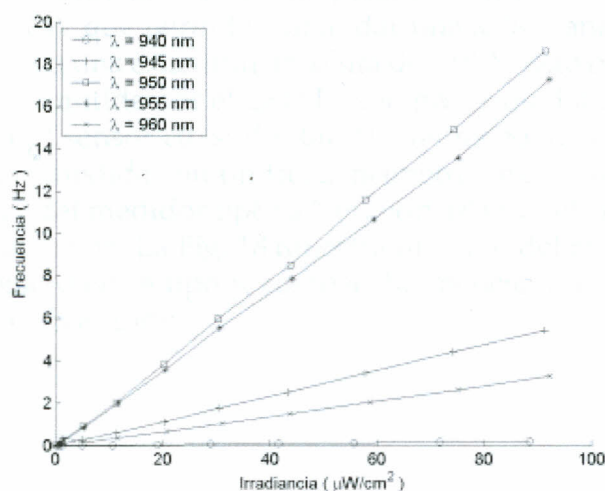


Fig. 16. Gráficas de la respuesta del fotodiodo cuasi-digital provisto del filtro pasabanda de interferencia.

10. RESULTADOS EXPERIMENTALES

DE LA RESPUESTA DEL FILTRO

QUASI-DIGITAL PROYECTO DEL FILTRO

PASABANDA DE INTERER

El primer resultado de la simulación es la respuesta en frecuencia del filtro, que se muestra en la figura 10.1. La respuesta en frecuencia del filtro es una curva que comienza en 0 dB a 0 Hz, sube a 20 dB a 1 kHz, y luego se vuelve a bajar a 0 dB a 10 kHz. La respuesta en frecuencia del filtro es una curva que comienza en 0 dB a 0 Hz, sube a 20 dB a 1 kHz, y luego se vuelve a bajar a 0 dB a 10 kHz.

La respuesta en frecuencia del filtro es una curva que comienza en 0 dB a 0 Hz, sube a 20 dB a 1 kHz, y luego se vuelve a bajar a 0 dB a 10 kHz. La respuesta en frecuencia del filtro es una curva que comienza en 0 dB a 0 Hz, sube a 20 dB a 1 kHz, y luego se vuelve a bajar a 0 dB a 10 kHz.

Figura 10.1
Respuesta en frecuencia del filtro

Figura 10.2
Respuesta en frecuencia del filtro

Figura 10.3
Respuesta en frecuencia del filtro

11. MATERIALES Y MÉTODO PARA COMPROBAR EL SISTEMA ÓPTICO FINAL DEL VISIBILÍMETRO

Finalmente, el estudio de la solución material para la supresión de la luz ambiente captada por el visibilímetro, finaliza con la comparación entre la respuesta del sensor cuasi-digital a la longitud de onda $\lambda = 950$ nm con el FPI en condiciones de laboratorio (obtención de la respuesta en la oscuridad) y en condiciones de campo (en exteriores con luz de día). El montaje experimental para ambas mediciones se muestra en la Fig. 17.

El control automático de la intensidad luminosa del LED IR se realiza controlando un circuito de polarización desde un programa .vi de LabVIEW que permite comandar una salida analógica en un chasis SCXI con una exactitud absoluta de 0.01 V. Esto permite variar la intensidad emitida por el LED IR con precisión. La irradiancia es recibida por el sensor cuasi-digital, el cual responde con una señal de frecuencia medida con un frecuencímetro Tektronix FCA3100, y por el sensor del medidor óptico Newport 1835-C, el cual mide este nivel de irradiancia. La Fig. 18 muestra una foto del montaje experimental probado en campo y, como se ha mencionado, es el mismo utilizado en laboratorio.

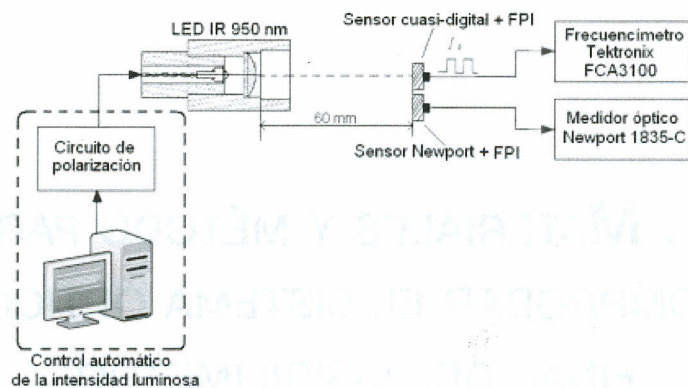


Fig. 17. Esquema del montaje experimental para la medición de la respuesta del fotodiodo cuasi digital con el filtro pasabanda de interferencia para las pruebas en laboratorio y en campo.



Fig. 18. Fotografía del montaje experimental para la prueba final en campo del sistema óptico del visibilímetro.

12. RESULTADOS SOBRE LA SOLUCIÓN MATERIAL PROPUESTA

La Fig. 19 muestra la respuesta del sensor cuasi-digital provisto del filtro pasabanda de interferencia (sensor +FPI) en condiciones de laboratorio (oscuridad), montaje Fig. 17, y la Fig. 20 es la respuesta del sensor +FPI en condiciones de campo (en exteriores con luz de día). En ambos casos, se ha aplicado un ajuste lineal de primer orden a los datos registrados.

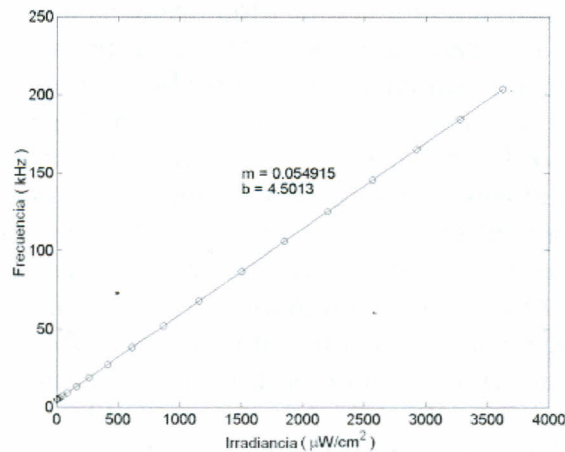


Fig. 19. Respuesta del sensor+FPI en condiciones de laboratorio.

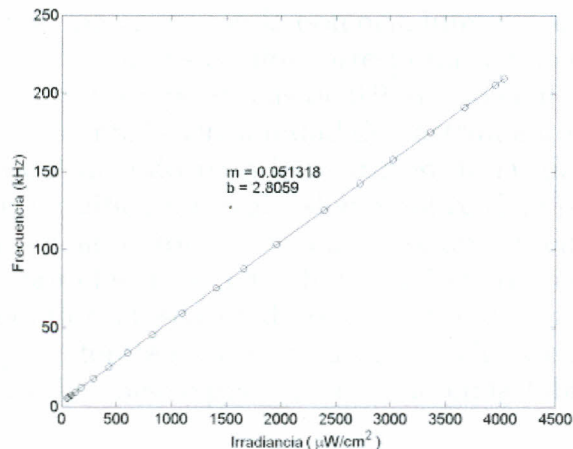


Fig. 20. Respuesta del sensor+FPI utilizando el LED IR del visibilímetro.

En el primer caso, Fig. 19, la pendiente es $k_1 = 0.0549 \text{ kHz}/\mu\text{W}/\text{cm}^2$ y en el segundo caso es $k_2 = 0.0513 \text{ kHz}/\mu\text{W}/\text{cm}^2$. La diferencia es $\sim 6\%$.

13. CONCLUSIONES

Los resultados del experimento para obtener la frecuencia del sensor cuasi-digital en función de la irradiancia recibida, han mostrado la variabilidad de la salida del sensor cuando se varía la longitud de onda de la irradiancia generada por la fuente de luz. Las características obtenidas revelan la buena linealidad del comportamiento estático del sensor y ayudan a predecir que su sensibilidad aumenta en la vecindad de los 900 nm. El monocromador Spex 270M permitió el registro de las características $f [Hz] = g (E [\mu W/cm^2])$ en el rango de 800nm a 1100nm con incrementos de 10 nm.

Los resultados del experimento para obtener la responsividad del sensor en función de la longitud de onda de la irradiancia recibida, se resumen en la Tabla I.

Los resultados de la Tabla I son útiles para elegir la longitud de onda de la luz emitida por la fuente de luz del sensor del visibilímetro y, de esta manera, obtener máxima sensibilidad de la respuesta del instrumento. Desafortunadamente, la fuente de luz (LED IR) disponible en el mercado, con la potencia lumínica especificada de 40 mW, emite a 950 nm. Este valor corresponde a una responsividad relativa en el sensor de poco más de 0.9, con lo cual no se compromete apreciablemente la sensibilidad del instrumento.

La eficacia del método para la medición de la luz dispersa por niebla con las modificaciones al sistema óptico del visibilímetro, ha sido validado en laboratorio, constatándose que la señal de frecuencia generada por el sensor cuasi-digital del instrumento, en condiciones de laboratorio (oscuridad), se corresponde con la irradiancia dispersada que interesa recibir, en campo con luz de día. Los resultados de las mediciones se pueden observar en la Tabla II.

Tabla I

	Responsividad relativa máxima	λ [nm]	Diferencia [%]
Dato fabricante	1	940	
Medición	1	920	
			+0.87

Tabla II

	Responsividad a la irradiancia [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	Diferencia [%]
Laboratorio	0.0549	
Campo	0.0513	
		~ 6

La pequeña diferencia en las responsividades a la irradiancia se ha logrado, en la solución material, con un FPI frecuencia central $\lambda = 950 \text{ nm}$, con una tolerancia de $\pm 5 \text{ nm}$.

El nuevo sistema óptico del visibilímetro será utilizado para la validación final del instrumento en las pruebas de laboratorio para obtener el rango de medición de la visibilidad.

Finalmente, cualquier detector óptico en instrumentos utilizados en aplicaciones ITS, tales como visibilímetros, transmisómetros, didró-

metros ópticos, detectores de lluvia, etc., el cual se usa para medir luz directamente o detectar luz para obtener otra cantidad física y que incorpora un fotodetector cuasi-digital, requerirá, necesariamente, alguna solución material para proveer al sensor de un medio de rechazo de interferencias lumínicas. Los métodos de caracterización de un sensor lumínico cuasi-digital presentados en este informe, pueden ayudar a sugerir una solución material para proteger la señal del sensor.

14. REFERENCIAS

- [1] R. Barrales Guadarrama, M. E. Rodríguez Rodríguez, V. R. Barrales Guadarrama, A. Mocholí Salcedo, J. H. Arroyo Núñez, Primer Prototipo de un Visibilímetro para el Entorno del Automóvil, Reporte de Investigación, Universidad Autónoma Metropolitana—Azcapotzalco, 1ª Ed., México, 2010, ISBN: 978-607-477-449-8.
- [2] R. Barrales Guadarrama, M. E. Rodríguez Rodríguez, V. R. Barrales Guadarrama, A. Mocholí Salcedo, J. H. Arroyo Núñez, Segundo Prototipo de un Visibilímetro para el Entorno del Automóvil, Reporte de Investigación, Universidad Autónoma Metropolitana—Azcapotzalco, 1ª Ed., México, 2011, ISBN: 978-607-477-450-4.
- [3] Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos/Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, 1990, Serie: OMM 8, ISBN: 9263300089.
- [4] H. Vogt, Visibility Measurement Using Backscattered Light, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 25, pp. 912-918, 1968, ISSN: 0022-4928.
- [5] J. A. Curcio, G. L. Knestrick, Correlation of Atmospheric Transmission with Backscattering, J. Opt. Soc. Am., Vol. 48, No. 10, pp. 686-689, October 1958.
- [6] H. C. Van de Hulst, Light Scattering by Small Particles, Dover Publications, 1957, ISBN: 0-486-64228-3.
- [7] J. V. Winstanley, M. J. Adams, Point Visibility Meter: A Forward Scatter Instrument for the Measurement of Aerosol Extinction Coefficient, Applied Optics, Vol. 14, No. 9, September 1975.
- [8] S. A. Tjugum, J. S. Vaagen, T. Jakobsen, B. Hamre, Use of Optical Scatter Sensors for Measurement of Visibility, J. Environ. Monit., 2005, Vol. 7, pp. 608-611.
- [9] <http://www.vaisala.com/en/Pages/default.aspx>
- [10] <http://www.sicocv.es/>
- [11] <http://www.duranelectronica.com/producto.php?idProducto=51&idIdioma=2>
- [12] J. L. Horner, Analog Visibility Computer, Appl. Opt., Vol. 15, 1976, pp. 999-1002.
- [13] N. V. Kirianaki, S. Y. Yurish, N. O. Shpak, V. P. Deynega, Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2002, ISBN 978-0-470-84317-8, pp. 89-126.
- [14] S. Y. Yurish, F. Reverter, R. Pallàs Areny, Measurement Error Analysis and Uncertainty Reduction for Period and Time Interval-to-digital Converters Based on Microcontrollers, Meas. Sci. Technol., Vol. 16, No. 8, 2005, pp. 1660-1666.
- [15] N. V. Kirianaki, S. Y. Yurish, N. O. Shpack, Methods of Dependent Count for Frequency Measurements, Measurement 29, 2001, pp. 31-50.
- [16] (2005) Infrared Light-to-Frequency Converter (TSL245R), Datasheet, [Online], Available: <http://www.taosinc.com/productdetail.aspx?product=46>.
- [17] <http://www.edmundoptics.com/products/displayproduct.cfm?productid=3198&PageNum=6&Sort=displayOrder&Order=asc#products>
- [18] http://www.edmundoptics.com/images/articles/fig-1-of_lg.gif

REPORTE DE INVESTIGACIÓN

VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE UN VISIBILÍMETRO PROVISTO DE UN CONVERTIDOR

UNIVERSAL DE FRECUENCIA A CÓDIGO DIGITAL

Se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2013 en los talleres
de la Sección de Impresión y Reproducción de la Universidad Autónoma
Metropolitana Unidad Azcapotzalco Av. San Pablo 180,

Col. Reynosa Tamaulipas

Del. Azcapotzalco, C. P. 02200, México, DF.

La edición estuvo a cargo de la Oficina de Producción Editorial y Difusión de la
División de Ciencias Básicas e Ingeniería con un tiraje de 40 ejemplares.



Departamento de Electrónica
División de Ciencias Básicas Ingeniería
Unidad Azcapotzalco

Universidad
Autónoma
Metropolitana



Casa abierta al tiempo Azcapotzalco