

NODO SENSOR INALÁMBRICO PARA MEDIR ILUMINACIÓN

Dr. Ernesto Sifuentes de la Hoya, Dr. Rafael González Landaeta, M.I. Gabriel Bravo Martínez,
Ing. Reyna G. Moreno Hernández

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

Una iluminación adecuada ayuda a prevenir accidentes, reducir problemas de salud, mejorar el rendimiento laboral y la concentración. En diversas áreas de trabajo, esparcimiento y vialidades la iluminación se mide habitualmente de forma manual para saber si cumple con las normas. Este artículo presenta la implementación de un nodo sensor inalámbrico (compacto, simple y de bajo costo) que mide periódicamente la intensidad de luz en un área específica y transmite su valor de forma inalámbrica. Con N nodos se puede crear una red inalámbrica de sensores para monitoreo y control autónomo de iluminación en diversas áreas de aplicación.

Palabras clave: Sensor resistivo LDR, Nodo sensor inalámbrico, Luxómetro, Iluminación.

Introducción

La iluminación se define como la magnitud que expresa el flujo luminoso que incide sobre un área o superficie, su unidad en el sistema internacional es el lux (Enríquez, 2005; Mark, 2000). Existen normas que establecen valores mínimos de iluminación para distintas áreas de trabajo, estudio, vialidades, esparcimiento, estacionamientos, y entidades tales como maquiladoras, hospitales y laboratorios (NOM-025-STPS-2008; NOM-013-ENER-2013). Una iluminación adecuada ayuda a prevenir accidentes, reducir problemas de

salud, mejorar el rendimiento laboral y la concentración.

Un luxómetro es un instrumento utilizado para medir el nivel de iluminación que incide en un punto específico. Para saber si se cumple con los niveles mínimos de iluminación requeridos por las normativas vigentes, en los centros laborales habitualmente la iluminación se mide de forma manual con un luxómetro portátil.

Los sistemas actuales que implementan un luxómetro digital típicamente utilizan

técnicas de acondicionamiento clásico que incluyen convertidor de corriente a voltaje, amplificador de voltaje y convertidor analógico a digital (Leon, 2007; Vega, 2012). Lo cual implica alto costo y alto consumo de energía sobre todo para aplicaciones a gran escala como en las redes inalámbricas de sensores. Por otro lado, existen soluciones donde la iluminación se convierte directamente en una señal digital de frecuencia variable, a esto se le conoce como sistemas casi-digitales (Dhananjaya, 1998), ya que la frecuencia puede ser digitalizada directamente con un microcontrolador.

Un luxómetro digital inalámbrico, que mida periódicamente la iluminación en un área específica y la transmita de forma inalámbrica hacia una unidad de gestión, es útil para implementar redes inalámbricas de luxómetros para el monitoreo, registro, gestión y control de iluminación. Así, las empresas, hospitales, instituciones educativas, centros de investigación, maquinado y ensamble, alumbrado público en general, entre otros, podrán establecer un plan de mantenimiento y cumplir con las normativas de iluminación. Además de ayudar a cumplir con las normas vigentes de iluminación, con un luxómetro digital se podrían tener los siguientes beneficios: mejorar el rendimiento y concentración de los empleados, estudiantes e investigadores,

así como también preservar su salud visual y reducir el índice de accidentes laborales y viales por una iluminación inadecuada. Así como también contribuir al ahorro de energía y hacer un uso eficiente de este recurso.

Las características que debe cumplir un luxómetro para ser utilizado en redes inalámbricas de sensores deben ser las de un nodo sensor inalámbrico. Es decir, debe ser compacto, bajo costo, bajo consumo de energía, alimentado a baterías y contar con una interfaz de comunicación inalámbrica. Este artículo presenta el diseño y la implementación de un nodo sensor inalámbrico (luxómetro digital inalámbrico) que mide periódicamente la intensidad de luz en un área específica y transmite su valor de forma inalámbrica hacia una unidad de gestión. Éste se implementó con un sensor resistivo LDR, un método de linealización por hardware, un circuito de interfaz directa de acondicionamiento de señal y un transceptor XBee S1. Con N nodos se puede crear una red inalámbrica de sensores para monitoreo y control de iluminación. La metodología propuesta puede servir como alternativa en el diseño de sistemas de medida inalámbricos en otras áreas de aplicación. Por ejemplo para medir temperatura, humedad, aceleración, presión, es decir, para sensores resistivos en general.

Materiales y Métodos

Arquitectura del sistema

La figura 1 muestra un diagrama a bloques del nodo sensor inalámbrico (luxómetro digital inalámbrico) propuesto. El sistema consta de una foto-resistencia LDR (sensor para medir iluminación) en paralelo con una resistencia de $100\ \Omega$ para linealizar su respuesta, así la iluminación se convierte en un cambio de resistencia (a). El USTI (*Universal Sensors and Transducers Interface*) es el dispositivo encargado de

medir y digitalizar la resistencia equivalente a la iluminación y enviar su valor hacia el transceptor inalámbrico XBee vía RS-232 (b). El XBee envía la información hacia la unidad de gestión (c). Finalmente, el receptor XBee conectado vía USB a la computadora recibe la información y la procesa a través de un programa implementado en LabVIEW® que es la interfaz de usuario (d).

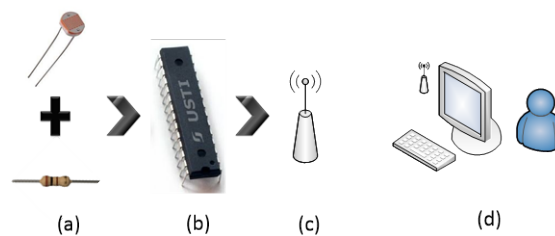


Figura 1. Diagrama a bloques del luxómetro digital inalámbrico propuesto.

Caracterización del sensor LDR

La LDR tiene la propiedad de variar su resistencia en función de la cantidad de iluminación que incide sobre su superficie, cuanto mayor sea el nivel de iluminación incidente menor es su resistencia y viceversa. En la oscuridad, normalmente la LDR tiene un valor de resistencia muy elevado (del orden de los mega-ohms), y en presencia de luz su valor puede ser de centenas de ohms. La relación entre la resistencia R de un fotoconductor y la iluminación E (densidad superficial de energía recibida expresada en lux), es

fuertemente no lineal. Un modelo simple es (Pallàs, 2001):

$$R_x = A E^{-z} \quad (1)$$

donde A y z dependen del material y las condiciones de fabricación. Para el SCd por ejemplo se tiene $0.7 < z < 0.9$. Son sensibles también a la temperatura, que afecta su sensibilidad a la radiación incidente en un grado tanto más alto cuanto menor sea la iluminación. La temperatura también es causa del denominado ruido térmico que se manifiesta como fluctuaciones de corriente cuando se aplica una tensión a la fotorresistencia para poder medir su valor. Tal como ocurre en los circuitos de acondicionamiento de señal

basados en amplitud de voltaje o corriente.

En este trabajo se utilizó una LDR una NORPS-12 del fabricante Silonex. La NORPS-12 es una célula fotoconductora SCd encapsulada en un revestimiento resistente a la humedad y dentro de una carcasa de plástico, su respuesta espectral va de los 400 a los 800 nm.

Para caracterizar la respuesta del sensor a distintos niveles de iluminación se construyó una caja de madera, de

22 x 27 x 32 cm, a la cual se le incorporó un foco de 100 Watts y un sistema para variar la iluminación. Cada valor de resistencia se midió con un multímetro digital MUL-040, el valor de iluminación se midió con un luxómetro comercial TENMA 72-7250. Se colocó el luxómetro y el sensor LDR dentro de la caja, de manera que, al variar la intensidad de luz se pudiera medir el valor correspondiente de resistencia e iluminación de forma simultánea (figura 2).

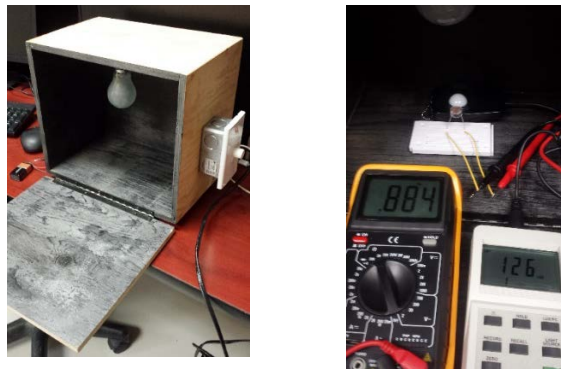


Figura 2. Caracterización de la LDR NORPS-12.

La iluminación se varió en un rango de 1 lux hasta 1000 lux, en pasos de 5 lux y 50 lux. La figura 3 muestra la relación resistencia-iluminación obtenida, se observa que la relación es fuertemente no-lineal, el modelo más simple obtenido para este sensor es:

$$R_x = 57992 E^{-0.777} \quad (2)$$

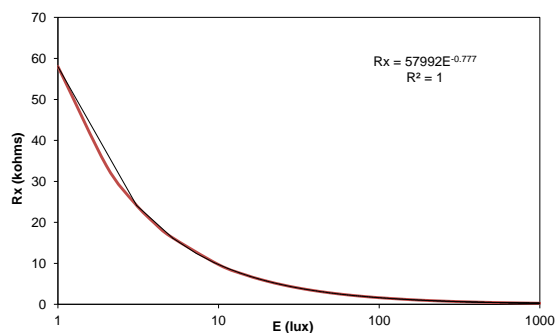


Figura 3. Relación resistencia vs iluminación obtenida experimentalmente durante la caracterización del sensor LDR NORPS-12.

La ecuación (2) cumple con las predicciones teóricas, ecuación (1). Derivando (1) con respecto a E y dividiendo por R_x , la sensibilidad relativa es

$$\frac{\frac{dR_x}{R_x}}{dE} = \frac{-z}{E} \quad (3)$$

la cual no es constante pues varía con iluminación aplicada.

Linealización del sensor LDR

En algunos casos se pretende utilizar un sensor resistivo (LDR) como un sensor linealizado a base de colocar una resistencia R en paralelo. La cual puede ser elegida de modo que en el margen de la magnitud, en este caso refiriéndonos a iluminación, de interés se tenga una buena linealidad o un error de linealidad aceptable. Para obtener

una respuesta lineal de resistencia e iluminación se colocó una resistencia en paralelo a la LDR. El método analítico que fue utilizado en este trabajo consistió en forzar tres puntos de paso en la curva de resistencia-iluminación resultante, el cual es típicamente utilizado para linealizar termistores (Pallàs, 2001), el paralelo de las dos resistencias es:

$$R_t = \frac{RR_x}{R + R_x} \quad (4)$$

la sensibilidad relativa es:

$$\frac{\frac{dR_t}{R_t}}{dE} = \frac{-R}{(R + R_x)E} \frac{z}{R_x} \quad (5)$$

Así la mejora de linealidad se obtiene a cambio de perder sensibilidad. Al aumentar R , la sensibilidad aumenta pero la linealidad disminuye y, por lo tanto, R debe ser elegida para mejorar la linealidad en un margen limitado de iluminación. Un método

analítico para estimar el valor de R es hacer que tres puntos equidistantes de la curva de respuesta resistencia-iluminación coincidan con una línea recta (Pallàs, 2001). Si se consideran tres valores equidistantes $E_1 - E_2 = E_2 - E_3$, la condición es:

$$\frac{RR_{E1}}{R + R_{E1}} - \frac{RR_{E2}}{R + R_{E2}} = \frac{RR_{E2}}{R + R_{E2}} - \frac{RR_{E3}}{R + R_{E3}} \quad (6)$$

Así, la resistencia R a colocar en paralelo con la LDR es:

$$R = \frac{R_{E2}(R_{E1} + R_{E3}) - 2R_{E1}R_{E3}}{R_{E1} + R_{E3} - 2R_{E2}} \quad (7)$$

La ecuación (7) no depende de ningún modelo matemático para R_x , así que este método puede ser aplicado a otro tipo de sensores resistivos cuya respuesta sea no-lineal, incluso cuando no se conozca explícitamente la función de transferencia del sensor.

Los puntos de ajuste utilizados son: (1 lux, 57992 Ω), (500 lux, 463.73 Ω), (1000 lux, 270.63 Ω). Lo cual da como resultado una resistencia de 76.21 Ω , y se

decidió utilizar una resistencia de 100 Ω (1% de tolerancia) en su lugar. La figura 4 muestra la relación de iluminación y resistencia R_t (LDR en paralelo con la resistencia de 100 Ω). Se observa que se gana linealidad a costa de perder sensibilidad. El comportamiento observado es cuadrático, con un coeficiente de correlación de 0.9969, la ecuación obtenida es:

$$R_t = 2 \times 10^{-5} \times E^2 - 0.428 \times E + 98.87 \quad (8)$$

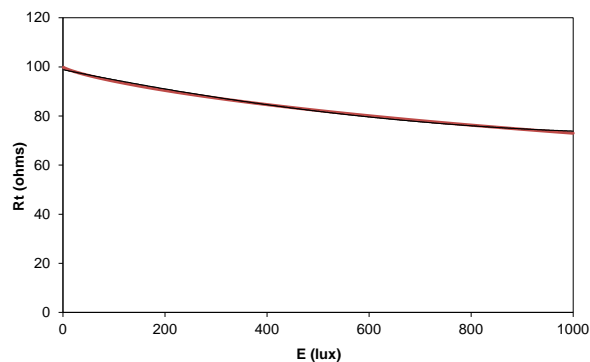


Figura 4. Relación resistencia vs iluminación obtenida experimentalmente durante la caracterización del sensor LDR NORPS-12 y la resistencia en paralelo.

Acondicionamiento de señal

La forma típica para conectar un sensor resistivo hacia un microcontrolador consiste en la digitalización de tensiones o corrientes

análogas obtenidas al amplificar la tensión o corriente de circuitos donde se incluyen los sensores, es decir, interfaces basadas en amplitud de tensión o corriente. En este tipo

de interfaces el sensor convierte la variable de interés (física o química) en una señal eléctrica; la etapa de acondicionamiento de señal, adapta márgenes y niveles de la señal (amplificación, desplazamiento de nivel, etc.) hacia un convertidor analógico; y la etapa de procesamiento analógico de señal realiza funciones de filtrado, linealización, desmodulación, etc.; y, la etapa de conversión analógica digital que puede estar o no embebida en el microcontrolador (Pallàs, 2001). Estos circuitos de acondicionamiento (con amplificadores, filtros, convertidores analógicos a digital, etc.), son soluciones relativamente complejas, de alto costo, consumo de energía y espacio. Sobre todo en aplicaciones a gran escala como las redes inalámbricas de sensores.

El USTI (*Universal Sensors and Transducers Interface*) es un circuito integrado de acondicionamiento de señal para diversos tipos de sensores (Sergey, 2011). Así, un sensor resistivo se puede conectar directamente al USTI, sin ningún componente electrónico activo, y obtener

así un sistema de medida compacto, simple y de bajo costo.

En este trabajo se utilizó el USTI para medir y digitalizar la resistencia equivalente a la iluminación R_t y enviar su valor hacia el módulo XBee vía RS-232 a través de los pines RXD y TXD, en la figura 5 se muestra el diagrama de conexiones que se implementó. Los valores de C , R_c y R_o fueron calculados según se especifica en (Sergey, 2011). R_c debe ser menor que R_t , se eligió de 100Ω . El capacitor fue de $20 \mu\text{F}$. R_o de 390Ω , todas las resistencias utilizadas son de precisión (1% de tolerancia).

El USTI se configuró para medir resistencia a través de un programa implementado en LabVIEW y conectado al USTI vía RS-232. Los comandos de configuración son M10, E100 y W1B: M10 establece el modo de medición de una resistencia; E100 especifica el valor de la resistencia de calibración $R_c = 100 \Omega$; y, W1B establece un tiempo de carga de 100 ms. (Sergey, 2011;USTI Data Sheet). La configuración RS-232 fue: 2400 baudios, no paridad y un bit de stop.

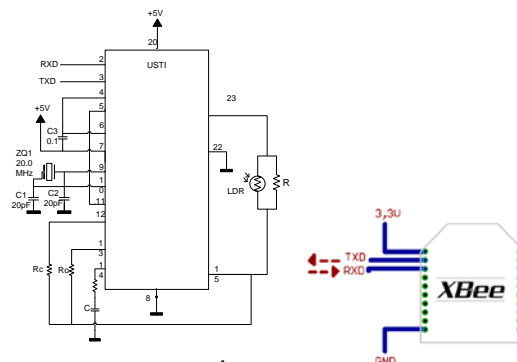


Figura 5. Diagrama de conexiones del USTI y el transceptor XBee S1

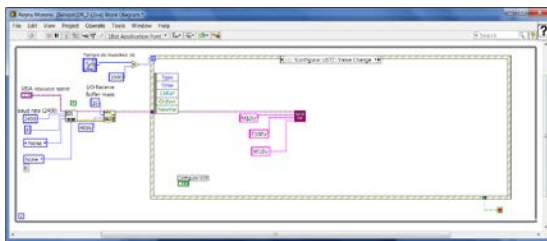
Interfaz de comunicación

La comunicación inalámbrica se implementó con dos transceptores XBee S1, uno conectado al USTI vía RS-232 y el otro conectado a la computadora, ambos se configuraron para establecer una comunicación punto a punto siguiendo el procedimiento indicado en la hoja de datos del fabricante (XBee S1 DataSheet) y el software libre X-CTU mediante el envío de comandos AT. Para que exista comunicación entre dos módulos, es necesario que tengan direcciones DL y MY encontradas, es decir, si el router se le asigna un comando DL = 0 y MY = 1, el coordinador necesitará tener los comandos DL = 1 y MY = 0. Además, deberán de

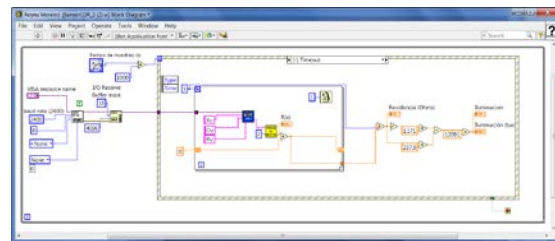
tener el mismo identificador de red PAN ID y canal CH.

Interfaz de usuario

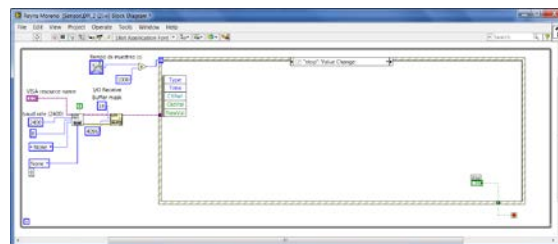
La interfaz del usuario se implementó en LabVIEW utilizando una arquitectura de programación basada en eventos. El primer evento ocurre cuando el usuario presiona el botón “Configurar USTI” (figura 6a). El evento timeout (figura 6b) ocurre cada vez que transcurre el tiempo de muestreo elegido por el usuario, este evento realiza el promedio de 5 lecturas de R_t e implementa la ecuación (8) para convertir la resistencia en iluminación, la cual se muestra en la gráfica y los indicadores numéricos del panel frontal. Al presionar el botón “Detener” se detiene la ejecución del programa (figura 6c).



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Código de la interfaz de usuario

Resultados

La figura 7 muestra la interfaz de usuario que se implementó para registrar y visualizar los valores de iluminación que envía el nodo sensor. Con ello, se puede llevar un historial del registro de iluminación y establecer el periodo de cada lectura.

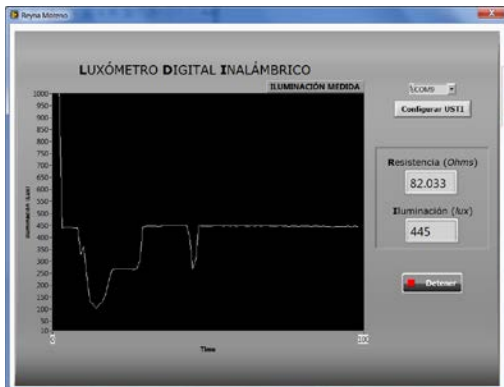


Figura 7. Interfaz de usuario que representa la unidad de gestión.

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos al medir la R_t con el multímetro y el sistema propuesto para diferentes niveles de iluminación. Se calculó el error relativo, tomando como valor esperado la R_t medida con el multímetro y como valor medido la R_t obtenida con el sistema. Se obtuvo un error máximo de 2.1 %, lo cual demuestra que el sistema implementado es capaz de medir resistencia con un error inferior al 2.1 %. También se muestra el nivel de iluminación y su error relativo, como se observa el sistema propuesto es capaz de medir iluminación con un error relativo inferior al 6 %. La figura 8 muestra el prototipo del sistema durante la realización de las medidas.

| E (lux) TENMA 72-7250 | R_t (multímetro) | R_t (Sistema) | Error (%) | E (lux) (Sistema) | Error (%) |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------|------------------------|--------------|
| 50 | 96.2 | 95.07 | 1.2 | 49.5 | 1.0 |
| 100 | 93.9 | 92.6 | 1.4 | 94.2 | 5.8 |
| 150 | 91.7 | 90.206 | 1.6 | 151.2 | 0.8 |
| 200 | 89.9 | 88.9 | 1.1 | 187.9 | 6.0 |
| 250 | 88.3 | 87.24 | 1.2 | 240.4 | 3.8 |
| 300 | 86.8 | 85.67 | 1.3 | 296.0 | 1.3 |
| 350 | 85.5 | 84.23 | 1.5 | 352.0 | 0.7 |
| 400 | 84.3 | 82.92 | 1.6 | 407.2 | 1.8 |
| 450 | 83.2 | 81.9 | 1.6 | 452.9 | 0.7 |
| 500 | 82 | 80.6 | 1.7 | 514.8 | 3.0 |
| 550 | 81.1 | 79.8 | 1.6 | 554.8 | 0.9 |
| 600 | 80.1 | 78.86 | 1.5 | 603.8 | 0.6 |
| 650 | 79.3 | 77.71 | 2.0 | 666.5 | 2.5 |
| 700 | 78.3 | 76.9 | 1.8 | 712.5 | 1.8 |
| 750 | 77.6 | 76.3 | 1.7 | 747.6 | 0.3 |
| 800 | 76.8 | 75.27 | 2.0 | 809.8 | 1.2 |
| 850 | 76.2 | 74.75 | 1.9 | 842.1 | 0.9 |
| 900 | 75.4 | 73.9 | 2.0 | 896.4 | 0.4 |
| 950 | 74.8 | 73.23 | 2.1 | 940.3 | 1.0 |
| 1000 | 74.1 | 72.55 | 2.1 | 986.0 | 1.4 |

Tabla 1. Resultados experimentales de la caracterización del sistema implementado.

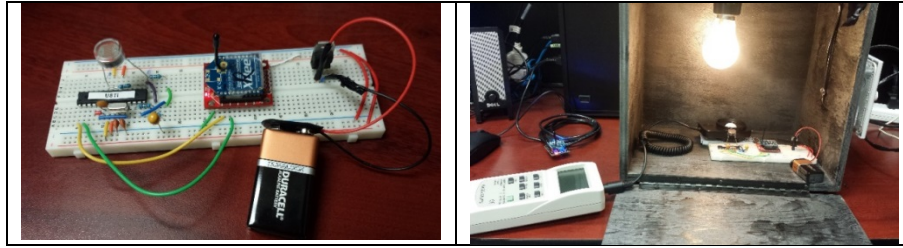


Figura 8. Prototipo final durante las pruebas de funcionalidad.

Conclusiones

Es posible implementar un luxómetro digital inalámbrico (nodo sensor inalámbrico para medir iluminación) compacto, de fácil instalación, bajo costo, bajo consumo de energía que las soluciones actuales. El sistema propuesto sirve para implementar una red cableada o inalámbrica de luxómetros como parte integral en la infraestructura de un sistema automatizado de monitoreo y control de iluminación. En general, la metodología propuesta sirve para diseñar sistemas de medida autónomos o inteligentes en distintas áreas de aplicación. Por ejemplo: automatización industrial, medidores remotos (agua, luz, gas), domótica, automoción, sistemas de vigilancia, etc.

Referencias

Dhananjaya B.M.,1998, “*Light meter*”, application note DS40160A/3_015 Microchip technology.

Enríquez Harper Gilberto,2005, “*Manual práctico del alumbrado*”, Limusa-Noriega, Mexico (2005).

Leon Arroba Adrián Luis, 2007, “*Construcción de un luxómetro digital*”, Tesis para obtener el título de Tecnólogo en Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Peru.

Mark Stanley Rea, 2000, “*The IESNA lighting handbook: reference & application*”, 9th ed. Illuminating Engineering Society of North America in New York, NY, ISBN: 0879951508.

NORMA Oficial Mexicana, NOM-025-STPS-2008, “*Condiciones de iluminación en los centros de trabajo*”,

<http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-025.pdf>, Jul-2014

NORMA Oficial Mexicana, NOM-013-ENER-2013, “*Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades*”

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5302568&fecha=14/06/2013, Jul-2014

Pallàs-Areny, R.; Webster, J. G., 2001, “*Sensors and Signal Conditioning*”, 2nd ed.; John Wiley & Sons: New York, USA, ISBN: 0-471-33232-1.

Sergey Yurish Y., 2011, “*Digital Sensors and Sensor Systems: Practical Design*”, IFSA International Frequency Sensor Association Publishing, ISBN: 978-84-615-6957-1.

Vega Pérez José Adán, 2012, “*Control automático de iluminación de un recinto*”, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F.