

## SISTEMA DE CONTROL DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EDIFICIOS

J.A. Hoyo-Montaña, G. Valencia-Palomo, R.A. Galaz-Bustamante, A. García-Barrientos  
Instituto Tecnológico de Hermosillo  
División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Av. Tecnológico S/N, Col. El Sahuaro C.P.83170, Hermosillo, México  
Tel. (662) 260 6500  
e-mail [jhoyo@ith.mx](mailto:jhoyo@ith.mx)

### 1. RESUMEN.

Este artículo presenta una propuesta de implementación de un Sistema de Automatización y Control de Edificios (SACE) que puede ser implementado en Edificios Individuales o en Conjuntos de Edificios. El sistema tiene como objetivo fundamental reducir el consumo de energía en los sistemas de iluminación y de acondicionamiento de aire, dos de las principales cargas que se encuentran en edificios de oficinas y/o académicas. El SACE implementa hacia el interior de los edificios una red inalámbrica ZigBee que permite una operación tipo malla entre los nodos. El ahorro energético en los edificios se obtiene al combinar un control de activación/desactivación de lámparas y aires acondicionados (con ajuste de temperatura a 26°-27°C) y reemplazo de lámparas fluorescentes y HID por lámparas LED. El sistema cuenta con un interfaz-hombre-máquina gráfico que permite una rápida configuración del sistema.

**Palabras Clave:** Eficiencia Energética, Control de Edificios, Redes Inalámbricas, Iluminación LED

### 2. ABSTRACT.

This paper presents an implementation proposal of a Building Automation and Control System (SACE) suitable for Individual Buildings of Building Complex. The system has the main objective of reduce the energy consumption of lighting systems and air conditioners (A/C), two of the most common loads found in office and/or classroom buildings. The proposed BACS implements a ZigBee wireless network towards the building interior, this allows a mesh operation between its nodes. Buildings energy savings are obtained by combining a turn-on/turn-off control of lamps and A/C, temperature operation adjust of 26°-27°C and retrofitting of fluorescent and HID lamps with LED lamps. The system has a graphic Human-Machine-Interface that allows a fast system configuration.

**Keywords:** Energy Efficiency, Building Control, Wireless Networks, Led Lighting

### 1. INTRODUCCIÓN

México tiene un fuerte compromiso con el medio ambiente y el uso racional de la energía, tal como se establece en la Ley General de Cambio Climático (LGCC), en el artículo segundo se pone como meta la reducción de un 30% de la emisión de gases de efecto invernadero para el año 2020 [1], este compromiso es ratificado durante la Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [2] en 2012. Esta meta puede ser

alcanzada no solo con el cambio de tecnología para la generación de energía eléctrica, sino también con un uso más eficiente de la misma, tal como se establece en el artículo tercero de la LGCC, para el 2020 se deberá contar con un sistema de subsidios para la promoción del uso de combustibles no fósiles y la eficiencia energética [1].

En la actualidad en empleo de energía eléctrica para fines de iluminación artificial de oficinas, comercios, industrias, etc., se sitúa entre el 17 y 20% del total de consumo [3] [4] [5]. Es por esta razón que el control de los sistemas de iluminación han recibido atención como una forma de hacer eficiente el consumo energético de las organizaciones [6] [7] [8] [9].

El sistema propuesto presenta un enfoque combinado de reconversión de instalaciones y eficiencia, usando tecnología de iluminación de alta eficiencia de tipo LED y un sistema de automatización de edificios para el Instituto Tecnológico de Hermosillo (ITH), que actualmente tiene un consumo promedio anual de 2'166,421 kWh.

El impacto del sistema propuesto en su implementación dentro del ITH se verá reflejado en:

1. Reducción del consumo promedio anual de energía usada para iluminación artificial de 941,764 kWh a 470,882 kWh al reemplazar cada lámpara fluorescente y de HID por iluminación de estado sólido usando lámparas LED. Esto representa un ahorro del 22% de consumo en relación a la facturación promedio anual.
2. Operación de un sistema de automatización de edificios que será capaz de controlar los sistemas de aire acondicionado e iluminación en áreas específicas para reducir el desperdicio de energía en las áreas que no se estén utilizando. Estos sistemas deben reducir el consumo de energía en un estimado de 7% en relación al consumo anual sin hacer ahorros energéticos.

### 2. ANTECEDENTES

El uso de redes alámbricas e inalámbricas para la implementación de Sistemas de Automatización y Control de Edificios (SACE) [7] [9] ha reportado buenos resultados en la reducción del uso de energía eléctrica en iluminación.

Algunas de las estrategias de administración que se pueden implementar en los SACE son las siguientes:

- Dividir por zonas el sistema de iluminación de acuerdo a su uso y requerimientos de luz.
- Programar el encendido/apagado del interruptor general por medio de un actuador remoto.
- Integrar el uso de luz natural con artificial en las áreas a iluminar.
- Controlar el encendido/apagado de las luces en respuesta a la ocupación real en las diferentes zonas a controlar la iluminación.
- Controlar el encendido/apagado y temperatura de operación de equipos HVAC (siglas en inglés de Heating, Ventilation and Air Conditioned).
- Definir posibles escenarios donde sea posible el control manual del sistema por medio de interruptores manuales.

La implementación de los SACE requiere de una infraestructura de comunicación. Esta infraestructura puede ser implementada por medio de dispositivos y estándares de tipo abierto como BACNet, LonWorks, KNX, DALI o Zigbee [7] [9]. Cada una de estas soluciones tiene sus pros y sus contras.

Existen varios desarrollos de controles de iluminación que emplean tecnología Zigbee, desde aplicaciones en alumbrado exterior [10] [11], oficinas [12], [13], hasta casas [14], [15].

Existen estudios que estiman en un 20% a 30% la reducción en el consumo de energía en edificios en los que se han implementado SACE para el control de iluminación y HVAC [16]. El desarrollo de estrategias de administración de cargas tales como HVAC en edificios, se requiere en ambientes donde las condiciones climáticas impactan en el consumo de energía [17]. Sookoor [18] implementa un sistema de sectorizado para el control de un sistema HVAC central mediante la implementación de una red inalámbrica de sensores y actuadores de bajo costo para reducir el desperdicio de energía al climatizar solo áreas que estén ocupadas en un edificio.

Un aspecto importante que se busca en los sistemas SACE es el ahorro de energía, en este sentido el empleo de lámparas tipo LED de alta intensidad como reemplazo de lámparas incandescentes y fluorescentes tiene varias ventajas, entre las que destacan el menor consumo de energía, mayor tiempo de vida útil y bajo impacto ambiental al reducir el contenido de mercurio en las lámparas como conjunto. En el aspecto de consumo de energía hay que resaltar que una lámpara incandescente tiene una eficiencia luminosa de 12 a 24 lúmenes/watt, una lámpara fluorescente de tubo está entre 50 y 70 lúmenes/watt, mientras que las lámparas LED tienen eficiencias que en la actualidad están entre 50 y 200 lúmenes/watt para LED de luz blanca [13].

Las ventajas de las lámparas LED las hacen "la siguiente generación de fuentes de luz" para la implementación de sistemas de control de iluminación inteligentes. El integrar lámparas LED con redes inalámbricas Zigbee aprovecha las ventajas de una red inalámbrica de corto alcance con las

características de alta eficiencia de los LED y su facilidad de control [19].

### 3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para poder generar ahorros y reducir el uso de la energía eléctrica un edificio académico o de oficinas, el sistema propuesto emplea dos enfoques complementarios:

- Reducir el consumo de energía eléctrica empleado en iluminación en un 40-50% al realizar una reconversión del sistema de iluminación instalado, cambiar las lámparas fluorescentes T8 de 32W por su equivalente de lámparas LED T8 de 16-18W.
- Incrementar los ahorros de energía al implementar un sistema de interruptores electrónicos para el control del sistema de iluminación y del sistema de acondicionamiento de aire.

La estructura del SACE para un conjunto de edificios (campus) como los que se tienen el ITH requiere de la comunicación entre una Unidad de Control Central (UCC) y los edificios donde se requiere del control. Esta UCC es la encargada de enviar los esquemas de encendido/apagado y control de temperatura a cada uno de los edificios del campus a través de la infraestructura de red que ya se encuentra disponible. La figura 1 muestra el esquema general del sistema.



Figura 1.- Estructura general del SACE para un conjunto de edificios.

En cada uno de los edificios se cuenta con su propia red inalámbrica de sensores y actuadores, esta red se encuentra conectada a la UCC a través del denominado Nodo Concentrador, el cual tiene la tarea de recibir el esquema de operación del edificio y de comunicarse con los nodos ruteadores que controlan las lámparas y equipos de aire acondicionado a través de una red tipo malla, tal como se muestra en la figura 2.

La red tipo malla se implementa utilizando un protocolo ZigBEE,

### 4. IMPLEMENTACIÓN

La UCC es una parte muy importante del SACE, es donde se realizan las operaciones de configuración de los esquemas de operación de lámparas y aires acondicionados de los edificios a controlar en una organización como el ITH. Esta configuración se hace a través de un software que cuenta con opciones de

importar información de la ocupación de aulas del Sistema Integral de Información (SII) en formato de hoja de cálculo, configurar o ajustar de manera manual los horarios de operación de aulas y edificios, generar archivos de configuración por edificio para su envío a los Nodos Coordinadores del sistema, y el envío de estos archivos ya sea de manera grupal o individual.

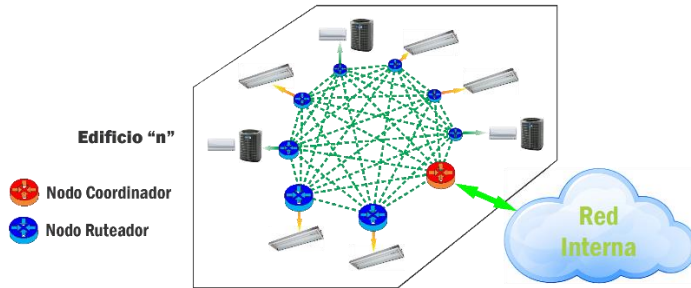


Figura 2.- Estructura general del SACE para un edificio.

El software de la UCC tiene un interfaz gráfico que facilita su operación. La ventana de inicio se muestra en la figura 3, en la cual se observa el menú de opciones: Sistema, Configurar, y Enviar Datos (figura 4). La opción Sistema sirva para dar por terminado el proceso de configuración del SACE.



Figura 3.- Ventana de inicio del software de la UCC

La configuración de la operación de cada una de las aulas o áreas de trabajo puede hacerse de dos formas complementarias, la primera como se mencionó anteriormente al importar información del SII de la institución a través de un archivo de hoja de cálculo simple que contenga los horarios de utilización de las áreas, esta información es procesada y convertida en una matriz de operación para lámparas y aires acondicionados para cada edificio. Otra opción de configuración consiste en asignar de manera manual la operación de un área o aula de manera individual, modificando la matriz operación correspondiente.

Para poder modificar de manera manual la matriz de operación, se requiere primero seleccionar el edificio con el que se desea trabajar. Al seleccionar la opción Configuración Manual se abre una ventana donde está una representación del campus del ITH con todos sus edificios identificados, ver

figura 5. En esta versión del software solo se encuentran habilitados para configuración nueve edificios, A1 a A9, en versiones posteriores se incluirán más edificios y el alumbrado exterior.

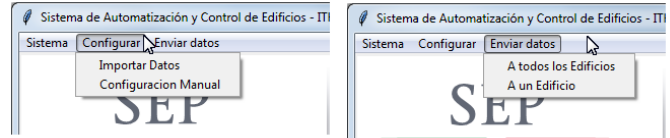


Figura 4.- Opciones de menú del SACE



Figura 5.- Ventana de Selección de Edificio del SACE

La selección del edificio puede realizarse por medio del menú Selección de Edificio o directamente en la imagen haciendo click en el edificio.

La selección de edificio abre una ventana en donde se presentan las opciones de áreas (aulas) en las cuales se puede modificar el esquema de operación de lámparas y aires acondicionados, mostrada en la figura 6.

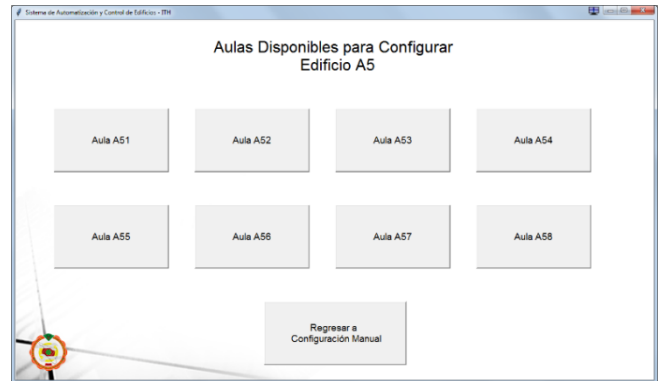


Figura 6.- Ventana de Selección de Aula.

La programación de horario posible para las aulas está acotada a inicios de operaciones a las 7:00 a.m. y conclusión a las 9:00 p.m., de lunes a viernes. La asignación de operación en una hora determinada se identifica visualmente con las áreas de color verde, mientras que las horas en las que las aulas no tienen utilización programada se visualizan en gris, ver figura 7. El cambio de estado



para una hora determinada se realiza haciendo click sobre el área correspondiente. De tal forma que la operación importada con la opción de leer el archivo de hoja de cálculo puede ser modificada sin afectar dicho archivo o el SII de donde proviene la información.

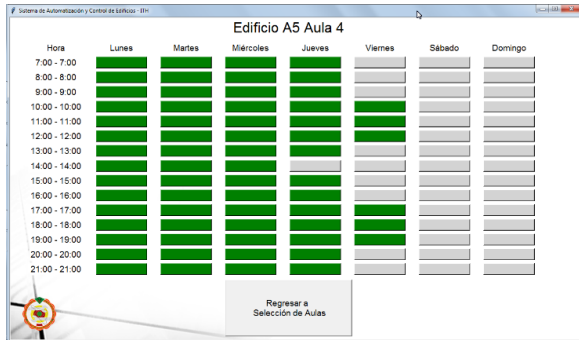


Figura 7.- Ventana de Modificación de Matriz de Operación para Aula.

La transferencia de la matriz de operación se realiza a través de un servicio FTP hacia el Nodo Coordinador de cada edificio. El Nodo Coordinador detecta la transferencia e inicia un proceso de actualización de su matriz interna de operación para el edificio.

El Nodo Coordinador está basado en un sistema Raspberry PI B+, para su enlace con la UCC se cuenta con un enlace Ethernet, mientras que para la comunicación con los elementos de la red de control del edificio cuenta con un enlace ZigBee implementado con un módulo XBee. Los Nodos Ruteadores están conectados a los actuadores finales, los cuales se encargan de activar/desactivar lámparas, activar/desactivar los A/C y ajustar la temperatura de operación de los mismos.

La activación/desactivación de los Nodos Ruteadores se realiza de manera individual, de tal forma, que el Nodo Coordinador debe conocer los identificadores de cada nodo de la red. Los Nodos Ruteadores implementados en este sistema, cuentan con una estructura general simple, y solo se diferencian por la inclusión de un control de temperatura para su aplicación en aires acondicionados, tal como se muestra en las figuras 8 y 9.

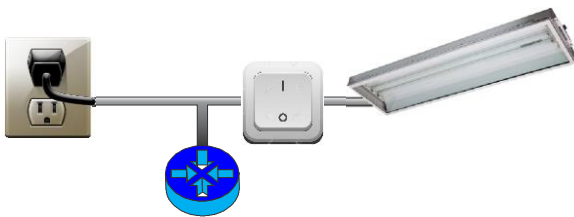


Figura 8.- Esquema general de un Nodo Ruteador para control de lámparas.



Figura 9.- Esquema General de un Nodo Ruteador para control de aires acondicionados.

Como puede observarse de los esquemas anteriores, la alimentación de los Nodos Ruteadores se obtiene de la red de energía eléctrica que se emplea para la alimentación tanto de lámparas como A/C, en ambos casos se cuenta con un circuito que hace las funciones de interruptor, el cual está implementado utilizando un circuito de aislamiento óptico entre Nodo Ruteador y un interruptor de estado sólido. Esta estructura se modifica para incluir el control de temperatura para los A/C.

El esquema del Nodo Ruteador mostrado en la figura 8, se ha implementado de manera modular, la figura 10 muestra el circuito de prueba para el sistema.

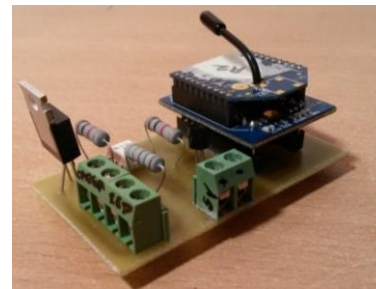


Figura 10.- Nodo Ruteador con Actuador Final Electrónico para Lámparas

El sistema ha sido probado con tres Nodos Ruteadores simulando tres áreas diferentes de un edificio, la asignación de operación realizada en la UCC fue transferida al Nodo Coordinador, procesada por este y transformada en las acciones de control que se muestran en las figuras 11 y 12

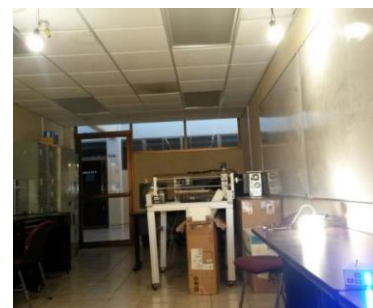


Figura 11.- Nodos Ruteadores Activados.



Figura 12.- Nodos Ruteadores Desactivados.

La implementación del SACE está programada para hacerse de manera escalonada en el campus del ITH, la primera etapa está en proceso de implementación en el Edificio A5, el cual tiene ocho aulas distribuidas en dos aulas, cada una de las aulas cuenta con un equipo de A/C de cuatro toneladas. Las aulas del edificio A5 cuentan con 6 lámparas de 2 tubos cada una, lo que hace un consumo base de 384W, tomando en cuenta una operación de 14 horas, 22 días al mes, se convierte en 118.23kWh/mes\*aula. Los equipos de A/C instaladas en este edificio no son nuevos, por lo que tienen un consumo de 6.5kW, operando 14 horas diarias, 22 días al mes, consumen en promedio 2,002 kWh/mes\*aula.

Por el reemplazo de las lámparas fluorescentes T8 empleando lámparas LED T8 ALTECH AE-L-T84-18 de 18 Watt, se tiene un consumo base de 216W o 66.53kWh/mes, un ahorro del 43.7%.

Analizando la ocupación programada de un aula del edificio, la A51, de las 70 horas a la semana disponibles, hay 10 que no tienen materia asignada, lo que representa un 85.7% de ocupación. La operación del SACE durante un mes representa, solo en el caso del A51 un ahorro de 8.64 kWh/mes\*aula. Con respecto al A/C, el ahorra representa 260kWh/mes\*aula.

Estos ahorros suman 268.64 kWh/mes\*aula. El ahorro de reconversión más operación del SACE se estima en 320.24 kWh/mes\*aula, un 15% sobre el consumo base de iluminación fluorescente y operación normal de A/C.

## 5. CONCLUSIONES

El consumo de energía de las organizaciones hoy en día es alto, en un edificio de oficinas o de aulas las principales cargas eléctricas son los sistemas de iluminación y de acondicionamiento de aire. Una estrategia para reducir el consumo energético consiste en reconvertir el sistema de iluminación, pasando de lámparas fluorescentes a lámparas LED, con lo cual se reduce en más de un 40% este tipo de consumo; al incluir un SACE en el esquema de ahorro energético, controlando la operación de lámparas y A/C en áreas de ocupación temporal, se obtienen ahorros energéticos adicionales, estos ahorros adicionales pueden ser de hasta un 30%, y dependen enteramente de los patrones de ocupación de las áreas controladas, en el caso analizado del A51, el ahorro fue del 15%, aunque todavía requiere de realizarse del estudio correspondiente al ahorro por fijar la temperatura de operación en 26°C en lugar de los 18° o 24° en los que actualmente opera.

Los resultados presentados son preliminares, ya que la operación completa del SACE en el edificio A5 está programada para el período Agosto-Diciembre 2015.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Honorable Congreso de la Unión, *Ley general de cambio climático*. México: Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012, p. 42.
- [2] Comisión Intersecretarial de Clambio Climático, *México, Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012.
- [3] Neweys online, "Reducing the Energy Consumption of Light." [Online]. Available: <http://www.neweysonline.co.uk/Reducing-The-Energy-Consumption-Of-Light/Static.raction>. [Accessed: 05-Feb-2015].
- [4] U.S. Energy Information Administration, "How much electricity is used for lighting in the United States? - FAQ - U.S. Energy Information Administration (EIA)." [Online]. Available: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=99&t=3>. [Accessed: 05-Feb-2015].
- [5] W. N. W. Muhamad, M. Y. M. Zain, N. Wahab, N. H. A. Aziz, and R. A. Kadir, "Energy Efficient Lighting System Design for Building," in *2010 International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, 2010, pp. 282–286.
- [6] L. Martirano, "Lighting systems to save energy in educational classrooms," in *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2011, pp. 1–5.
- [7] F. J. Bellido-outeirino, J. M. Flores-arias, F. Domingo-perez, A. Gil-de-castro, A. Moreno-munoz, and S. Member, "Building Lighting Automation through the Integration of DALI with Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Consum.*, vol. 58, no. 1, pp. 47–52, 2012.
- [8] G. Parise, L. Martirano, and S. Member, "Daylight Impact on Energy Performance of Internal Lighting," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 1, pp. 242–249, 2013.
- [9] M. Tariq, Z. Zhou, J. Wu, M. Macuha, T. Sato, and S. Member, "Smart Grid Standards for Home and Building Automation," in *2012 IEEE Power System Technology (POWERCON)*, 2012, pp. 1–6.
- [10] J. D. Lee, K. Y. Nam, S. H. Jeong, S. B. Choi, H. S. Ryoo, and D. K. Kim, "Development of Zigbee based Street Light Control System," in *PSCE'06 Power Systems Conference and Exposition*, 2006, pp. 2236–2240.
- [11] A. A. Siddiqui, A. W. Ahmad, H. K. Yang, and C. Lee, "ZigBee Based Energy Efficient Outdoor Lighting Control System," in *14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2012, pp. 916–919.
- [12] C.-H. Hung and Y.-W. Bai, "Half-tone control method in white light leds by using an embedded remote controller with zigbee communication," in *23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2010, 2010, pp. 1–6.
- [13] C. Hsu, S. Yang, T. Hsu, and W. Wu, "Practical design of active and intelligent energy-saving system with modules strategy," in *2010 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, 2010, no. July, pp. 3002–3008.
- [14] J. Han, H. Lee, and K. Park, "Remote-Controllable and Energy-Saving Room Architecture based on ZigBee Communication," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 264–268, 2009.
- [15] Y. Wang and Z. Wang, "Design of intelligent residential lighting control system based on ZigBee wireless sensor network and fuzzy controller," in *2010 International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface (MVHI)*, 2010, pp. 561–564.
- [16] D. Fugate, P. Fuhr, and T. Kuruganti, "Instrumentation Systems for Commercial Building Energy Efficiency," in *2011 Future of instrumentation International Workshop (FIIW)*, 2011, pp. 21–24.
- [17] N. Nguyen, Q. Tran, and J. Leger, "A real-time control using wireless sensor network for intelligent energy management system in buildings," in *2010 IEEE Workshop on Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS)*, 2010, pp. 87–92.
- [18] T. Sookoor, B. Holben, and K. Whitehouse, "Feasibility of Retrofitting Centralized HVAC Systems for Room-Level Zoning," in *2012 International Green Computing Conference (IGCC)*, 2012, pp. 1–10.
- [19] Y. Jun and W. Wei, "LED lighting Control System Based on the Zigbee Wireless Network," in *2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA)*, 2010, pp. 892 – 895.