



SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE DE SOMBRAS PARA EL CONFORT LUMÍNICO EN OFICINAS DE EDIFICIOS PÚBLICOS

Reyes-Alonso, G^a, Melchor-Chávez, P^a, Falcón-Gálvez, M^a.

^aInstituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo. División de Ingeniería Electromecánica. Paseo del Agrarismo 2000. Carr. Mixquiahuala - Tula, km 2.5. Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, México. C.P. 42700. greyes@itsoeh.edu.mx.

Recibido 31 de octubre 2016; aceptado 13 de diciembre 2016

Palabras clave:

Ahorro de energía, control de iluminación, lógica difusa

RESUMEN. Actualmente, del total de la energía eléctrica generada en el mundo, cerca del 90% requiere de procesos de extracción y combustión de combustibles fósiles. Expertos aseguran que la mitad de las reservas de combustibles fósiles con las que cuenta el mundo ya han sido consumidas en un 50% hasta el año 2015. En México, un 70% de la energía eléctrica es generada mediante hidrocarburos. Durante el proceso de conversión de energía, existe también una gran producción de CO₂, lo que debilita la capa de ozono y contribuye al calentamiento global. En los edificios se consumen alrededor del 40% del total de energía anual a nivel mundial. Los sistemas de iluminación en el sector comercial consumen alrededor del 30-40% del total de la energía eléctrica en el mundo. El propósito de este trabajo fue desarrollar un sistema de control inteligente de sombras para satisfacer las necesidades del confort lumínico al interior de oficinas de edificios públicos, con un impacto en el ahorro de energía eléctrica a través del control de una persiana enrollable motorizada, basado en el monitoreo de las variables lumínicas internas y externas. Se implementó, para el desarrollo del sistema de control de iluminación un controlador difuso en un controlador programable (PLC), por medio del uso de sensores de iluminación, lámparas de balastro dimeable y una persiana motorizada. Por consiguiente, se obtuvo un ahorro energético de hasta un 30% y al mismo tiempo se mantuvo el confort lumínico al interior de las oficinas del edificio. Con el desarrollo e implementación de un sistema de control inteligente de sombras se logra contribuir a la generación de la sustentabilidad en oficinas de edificios públicos.

Key words:

Energy-save, illumination control, fuzzy logic

ABSTRACT. Currently, of the total electricity generated in the world, about 90% of it requires processes of extraction and combustion of fossil fuels. Experts say that half of the world's fossil fuel reserves have already been consumed by 50% by 2015. In Mexico, 70% of electricity is generated by hydrocarbons. During the energy conversion process, there is also a large production of CO₂, which weakens the ozone layer and contributes to global warming. In buildings, about 40% of the total annual energy consumption is consumed worldwide. Lighting systems in the commercial sector consume about 30-40% of the total electric energy in the world. The purpose of this work is to develop a system of intelligent shading control to meet the needs of light comfort within public buildings offices, with an impact on the saving of electric energy through the control of a motorized roller shutter based on The monitoring of internal and external light variables. For the development of the lighting control system, a fuzzy controller in a programmable controller (PLC) is implemented, through the use of lighting sensors, dimmable ballast lamps and a motorized shutter. As a result of achieving energy savings of up to 30% and at the same time maintaining light comfort within the building's offices, the development and implementation of an intelligent shadow control system contributes to the generation of Sustainability in offices of public buildings

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, debido a los estilos de vida moderna y al crecimiento de la población a nivel mundial, la demanda de energía eléctrica ha aumentado de forma exponencial, de continuar con esta tendencia es posible que la demanda exceda en la capacidad de abastecimiento^{1, 2}. En el

proceso de la generación de energía eléctrica, cada año se producen en el mundo millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global^{1, 3}. Investigaciones recientes muestran el uso de energías limpias para el desarrollo sustentable como una alternativa para la reducción del





consumo de los combustibles fósiles, sin embargo, esto representa un alto costo y un lento crecimiento en el desarrollo de estas tecnologías⁴. Esto presenta una oportunidad para evitar el crecimiento exponencial de este recurso; esta oportunidad se da en los llamados "edificios inteligentes" un concepto de tecnologías de la información, además de facilitar un entorno de trabajo cómodo procurando optimizar el uso de la energía eléctrica al minimizar los costos operativos⁵. Hoy en día, un edificio inteligente se compone de un conjunto de sistemas dinámicos y sensibles, diseñados para satisfacer los requisitos del usuario, a fin de proporcionar una alta productividad y rentabilidad en los entornos operativos^{6,7}.

Los sistemas de control de iluminación son parte de una construcción inteligente, deben ser dinámicos y flexibles para adaptarse a las condiciones de iluminación con el fin de maximizar la luz natural y para asegurar el confort visual de los usuarios⁸. Para la buena práctica de iluminación, es esencial que además de la iluminación requerida se satisfagan necesidades cualitativas y cuantitativas. Los requisitos de iluminación son determinados por la satisfacción de tres necesidades humanas básicas⁹:

- Confort visual, que de modo indirecto también contribuyen a un elevado nivel de productividad.
- Prestaciones visuales, en las que los trabajadores son capaces de realizar sus tareas visuales.
- Seguridad.

Por lo tanto, una iluminación correcta es aquella que permite distinguir las formas, los colores, los objetos en movimiento y apreciar los relieves, y que todo ello, asegure el confort visual permanentemente. Se debe considerar básicamente tres puntos, que situados por orden de importancia son los siguientes¹⁰:

- Nivel de iluminación.
- Deslumbramientos.
- Equilibrio de las luminancias.

Para permitir que las personas realicen tareas visuales de modo eficiente y preciso, se debe prever una iluminación adecuada y apropiada. La iluminación puede ser proporcionada mediante luz natural, alumbrado artificial o una combinación de los mismos.

Para satisfacer los requisitos de iluminación para lugares de trabajo en interiores, en cuanto a las necesidades de confort y requisitos visuales se considera la norma mexicana NOM-025-STPS-2008¹¹ referenciada en base a la norma española¹². La luz natural puede proporcionar la totalidad o parte de la iluminación para las tareas visuales.

Al variar el nivel y la composición espectral con el tiempo proporciona una variación en el interior. La luz natural puede crear un modelado específico y una distribución de luminancias debido a su flujo luminoso casi horizontal procedente de las ventanas laterales.

En los interiores con ventanas laterales, la luz natural disponible disminuye rápidamente con la distancia a la ventana. Es necesario un alumbrado suplementario para asegurar la iluminancia requerida en el puesto de trabajo y para equilibrar la distribución de luminancias dentro de la sala. Puede usarse conmutación y/o regulación del flujo luminoso automático o manual para asegurar la integración apropiada entre alumbrado eléctrico y luz natural¹².

Durante el periodo 2003-2013, el consumo nacional de energía eléctrica mantuvo un crecimiento medio anual de 3.4 %, como resultado de la dinámica de los sectores residencial y mediana industria principalmente. En el 2014 las ventas totales fueron de 209,211 GWh en donde el sector industrial consumió el 58.2 %, el sector residencial consumió el 25.9 %, el sector servicios y bombeo agrícola con 9.1 %¹³.

En la sección 2 se presenta la caracterización de las reglas difusas del





sistema; en la sección 3 se presenta el ahorro de energía eléctrica.

Por lo tanto, se planteó el objetivo de desarrollar un sistema de control inteligente de sombras para satisfacer las necesidades de confort lumínico al interior de oficinas de edificios públicos, con un impacto en el ahorro de energía eléctrica a través de un controlador inteligente de sombras por medio de una persiana enrollable motorizada, basado en el monitoreo de las variables lumínicas internas y externas.

1.1. Estado del arte

En materia de energía y ciencia en los edificios en las últimas décadas ha incrementado, pero muchos edificios nuevos carecen de diseño para aprovechar la luz del día y se puedan integrar lo suficiente en los sistemas de iluminación artificial. En los casos en que exista una integración, se ha obtenido un potencial de ahorro de energía en iluminación entre 10.8 % a 44.0 % con una iluminación externa de 5,000 lux, y entre 20.6 % y 86.2 % para una iluminación externa de 10,000 lux; estos resultados obtenidos a través del diseño de una ventana ideal ¹⁴.

Así también, en algunos estudios de casos con respecto a la iluminación natural, se han obtenido ahorros de energía de hasta un 50 % a lo largo de la pared de la ventana debido a la capacidad de disponibilidad de luz visible. Además, la luz del día en los edificios es preferida por la mayoría de los ocupantes ⁹.

1.2. Consideraciones teóricas

Uno de los acontecimientos más importantes dentro de la tecnología de los microprocesadores inteligentes es el uso del control en los sistemas de iluminación inteligente. Estos controles proporcionan mayor flexibilidad, lo que lleva a una mejor gestión de la luz. Esto hace posible crear un entorno estéticamente agradable, y al mismo tiempo tener ahorros de energía. El concepto detrás de estos controles es operar la iluminación automáticamente de acuerdo a la

función de una zona, la hora del día, los niveles de luz ambiental y de la ocupación ¹⁵.

Los controles de iluminación inteligente presentan muchas ventajas sobre los sistemas de control convencional, teniendo la capacidad de la creación de un ambiente confortable, mayor flexibilidad de diseño, ahorro de energía, reducción de los costos de reemplazo de las lámparas y la seguridad. Las tres operaciones de medición, decisión y acción, siempre están presentes en todo tipo de control ¹⁵.

1.2.1 Fuzzificador

En este tipo de control se relaciona un valor medido x con un grado de pertenencia μ_x llamado conjunto difuso, que consigue una nueva cuantificación de la variable x en términos de expresiones de lingüística (por ejemplo, Alto, Medio, Bajo). Por el momento para este estudio se consideran dos tipos de conjuntos difusos con la finalidad de implementarlos en un sistema real para evaluar su respuesta en el sistema y el confort visual a 500 luxes sobre el plano de trabajo (Figura 1).

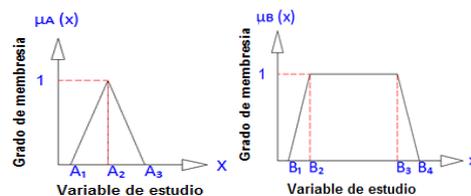


Figura 1. Conjuntos difusos a considerar; izquierda, conjunto triangular y derecha, conjunto trapezoidal.

Las funciones de pertenencia μ_x para estos conjuntos son los siguientes:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & x = A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_2 - A_1}, & A_1 < x < A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_3 - A_2}, & A_2 < x < A_3; \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad \text{Ec. 1}$$





$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & B_2 < x < B_3; \\ 1 - \frac{|B_2 - x|}{B_2 - B_1}, & B_1 < x < B_2; \\ 1 - \frac{|x - B_3|}{B_4 - B_3}, & B_3 < x < B_4; \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad \text{Ec. 2}$$

1.2.2 Bloque de inferencia

En esta parte, a través de una secuencia de reglas de inferencia de tipo <if ... then>, se crea el controlador de salida en términos de conjuntos lógicos. Para generar una figura que tiene una acción correctiva en el sistema de control, es necesario realizar el proceso inverso logrado en el fuzzificador.

1.2.3 Defuzzificador

La salida que genera el mecanismo de inferencia es una salida difusa, esto significa que no puede ser interpretada por un elemento externo (por ejemplo un controlador) que sólo manipule información numérica. Para lograr que la salida del sistema difuso pueda ser interpretada por elementos que solo procesen información numérica, se debe convertir la salida difusa del mecanismo de inferencia; este proceso lo realiza el defuzzificador.

La salida del mecanismo de inferencia es un conjunto difuso resultante, para generar la salida numérica a partir de este conjunto existen varias opciones como el Centro de Gravedad, los Centros Promediados entre otros (Figura 2) ¹⁶.

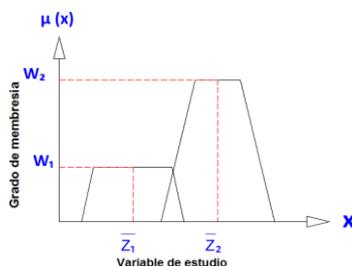


Figura 2. Defuzzificador de centros.

METODOLOGÍA

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el edificio 1 planta alta del Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo, en la oficina 7.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó un Controlador Lógico Programable “PLC” CompactLogix L23E (Figura 3). (comprendido en 4 módulos, el primero con 16 entradas digitales, el segundo con 16 salidas digitales, el tercero con 4 entradas analógicas en tensión, 4 entradas analógicas en corriente, 2 salidas analógicas en tensión, 2 salidas analógicas en corriente y el cuarto tiene contadores rápidos). Una forma esquemática de los diferentes componentes utilizados en la oficina 7 del edificio 1 se muestra en la Figura 4.



Figura 3. Controlador Lógico Programable, PLC.

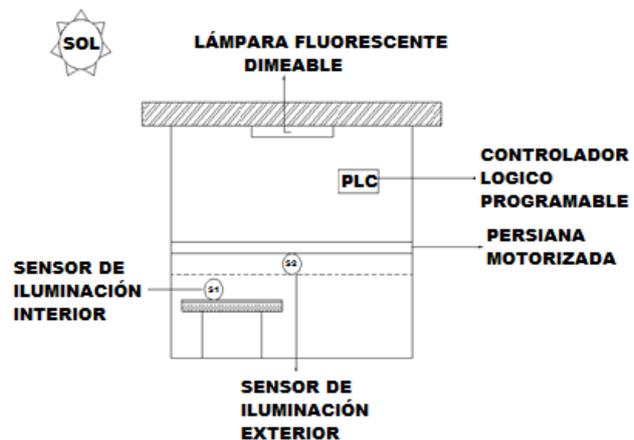


Figura 4. Elementos constitutivos del proyecto.

El desarrollo de las variables lingüísticas de entrada para el sensor exterior se planteó con base a las lecturas que se obtuvieron por





un luxómetro (Figura 5). Con respecto al sensor interior se plantearon las variables lingüísticas de entrada mostradas en la Figura 6. Y para las variables lingüísticas de salida de la lámpara dimeable se ilustran en la Figura 7.

Las reglas difusas planteadas para el sensor interior, sensor exterior y la lámpara dimeable se presentan en la Tabla 1.

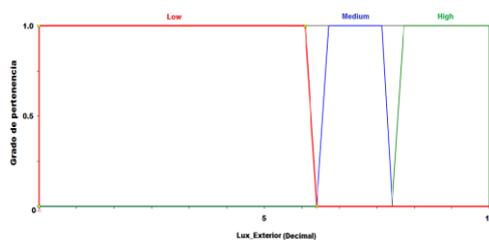


Figura 5. Variables lingüísticas de entrada para el sensor exterior.

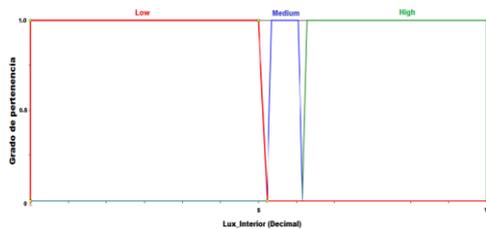


Figura 6. Variables lingüísticas de entrada para el sensor interior.

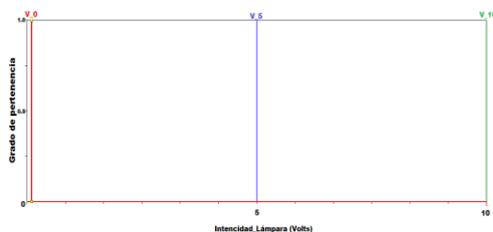


Figura 7. Variables lingüísticas para la lámpara dimeable.

Tabla 1. Reglas difusas para el sensor interior, sensor exterior y la lámpara dimeable.

1. IF (Lux_Interior IS low) AND (Lux_Exterior IS medium) THEN (Intencidad_Lampara IS V_5)
2. IF (Lux_Interior IS low) AND (Lux_Exterior IS low) THEN (Intencidad_Lampara IS V_10)
3. IF (Lux_Interior IS low) AND (Lux_Exterior IS high)

- THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
4. IF (Lux_Interior IS medium) AND (Lux_Exterior IS medium) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
5. IF (Lux_Interior IS medium) AND (Lux_Exterior IS low) THEN (Intencidad_Lampara IS V_10)
6. IF (Lux_Interior IS medium) AND (Lux_Exterior IS high) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
7. IF (Lux_Interior IS high) AND (Lux_Exterior IS medium) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
8. IF (Lux_Interior IS high) AND (Lux_Exterior IS low) THEN (Intencidad_Lampara IS V_10)
9. IF (Lux_Interior IS high) AND (Lux_Exterior IS high) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)

Asimismo, se plantearon las variables lingüísticas de salida para la persiana motorizada en base al monitoreo del número de lux sobre el plano de trabajo (Figura 8). Por otra parte, las reglas difusas que se plantearon para el sensor exterior y la persiana motorizada se muestran en la Tabla 2.

Para obtener el diagrama en escalera (Figura 9) se obtuvo el algoritmo de control en el fuzzyDesigner e importó al RSLogix 5000. La Figura 10, muestra el sistema real del control de lógica difusa.

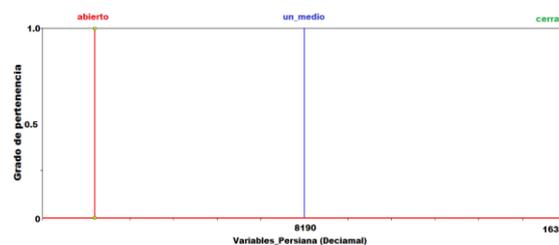


Figura 8. Variables lingüísticas para la persiana motorizada.

Tabla 2. Reglas difusas para el sensor exterior y la persiana motorizada

1. IF (Lux_Exterior IS low) THEN (Variables_Persiana IS cerrado)
2. IF (Lux_Exterior IS high) THEN (Variables_Persiana IS un medió)
3. IF (Lux_Exterior IS medium) THEN (Variables_Persiana IS abierto)



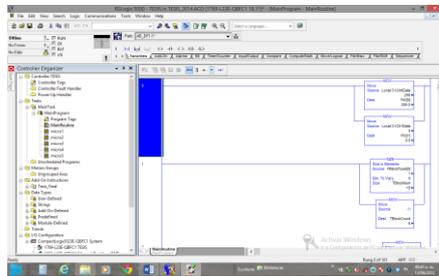


Figura 9. Diagrama en escalera del sistema inteligente.

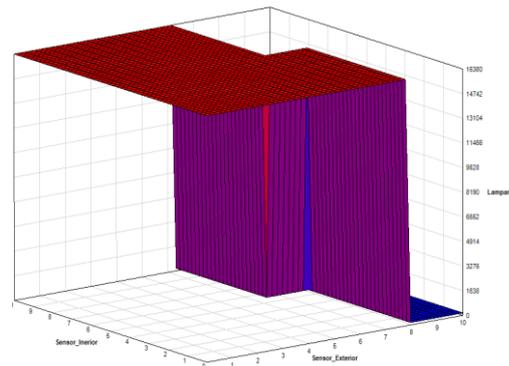


Figura 12. Gráfica en 3D del sistema inteligente (sensor interior, sensor exterior y lámpara).



Figura 10. Sistema real del controlador de lógica difusa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema inteligente que se obtuvo en el FuzzyDesigner muestra la respuesta del sistema (Figura 11 y Figura 12).

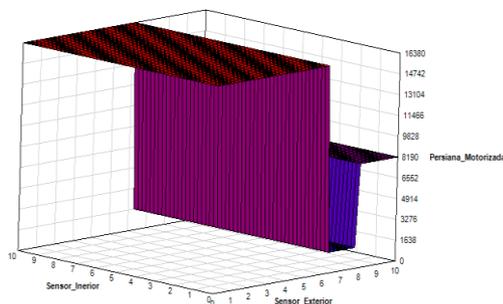


Figura 11. Gráfica en 3D del sistema inteligente (sensor interior, sensor exterior y persiana motorizada).

La potencia consumida por las lámparas fluorescentes en las oficina 7 del edificio-1 fueron medidas con un analizador de energía, este mostró un valor de 0.071 kWh y también se midió con un fluxómetro la iluminación sobre el plano de trabajo de 80 luxes. La potencia consumida por las lámparas dimeables que se utilizaron en este proyecto en la oficina 7 fueron de 0.112 kWh con una iluminación sobre el plano de trabajo de 480 luxes. En la Tabla 3, se puede observar a detalle la potencia real de consumo por la lámpara y el número de luxes sobre el plano de trabajo.

Tabla 3. Potencia real consumida y número de luxes con respecto al tipo de lámpara.

Tipo de lámpara	Potencia real consumida kWh	Número de Luxes en el plano de trabajo
2X32W	0.071	80
F96T12.D.EX	0.112	480

Cabe mencionar que la altura de las lámparas en la oficina 7 fue de 2.5 m con respecto al piso. Por lo anterior, en una oficina que normalmente trabaja en un promedio de 8 horas diarias entre las 9:00 a 17:00 horas, la potencia consumida es de 0.568 kW con lámparas de 2X32W. De tal manera que, implementado el sistema





inteligente con lámparas F96T12.D.EX, se llevó a cabo el monitoreo del consumo de energía de la oficina 7 (Figura 13), donde el consumo promedio fue de 0.409 kW. Por consiguiente, este sistema puede llegar a ahorrar hasta 30 % de energía eléctrica en un día despejado, asegurando un confort de iluminación de 480 lux sobre el plano de trabajo.

En estudios similares el ahorro de energía eléctrica se ha obtenido en hasta un 70 % en sistemas de iluminación aplicando la lógica difusa en maquetas, en condiciones ideales o en simulaciones¹⁷. Por consiguiente, este proyecto presenta oportunidades de mejora porque se pueden implementar lámparas de led dimeables que consumen menos energía eléctrica.

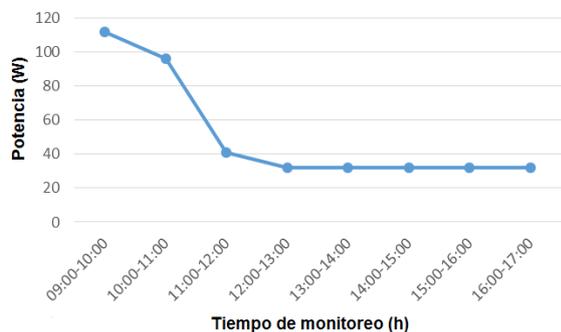


Figura 13. Potencia consumida por hora en la oficina 7 con el sistema inteligente.

CONCLUSIONES

Con este proyecto, se logró desarrollar el algoritmo de control inteligente en un sistema real para el confort de iluminación en el interior de una oficina pública de acuerdo a la norma NOM-025-STPS-2008, referenciada por la norma española UNE-EN 12464-1.

De tal manera que, el controlador del sistema fue ideal, debido a que cuando se implementó en el sistema real, la persiana y la lámpara dimeable trabajaron mucho para mantener las condiciones ideales.

Se obtuvo un ahorro en energía eléctrica de hasta un 30 % con el sistema real,

asegurando un confort de iluminación sobre el plano de trabajo. Cabe mencionar que, el ahorro se tuvo en un día despejado; quedando abierta la posibilidad de mejorar el sistema en cuanto al control de la persiana motorizada y a los sensores de iluminación.

Se logró implementar un controlador basado en Lógica difusa en un PLC y es importante mencionar que es una alternativa para los sistemas industrial no lineales con la condición que los actuadores tengan la capacidad de respuesta del sistema. El PLC como herramienta industrial puede ser utilizado para desarrollar sistemas de control avanzados.

REFERENCIAS

1. Lew D.J. (2000) Alternatives to Coal and Candles: Wind Power in China. *Energy*, 28: 271-286.
2. Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9), 2265-2300.
3. Di Stefano, J. (2000). Energy efficiency and the environment: the potential for energy efficient lighting to save energy and reduce carbon dioxide emissions at Melbourne University, Australia. *Energy*, 25(9), 823-839.
4. Midilli, A., Dincer, I., & Ay, M. (2006). Green energy strategies for sustainable development. *Energy Policy*, 34(18), 3623-3633.
5. Wong, J. K., Li, H., & Wang, S. W. (2005). Intelligent building research: a review. *Automation in construction*, 14(1), 143-159.
6. Osterhaus, W. K. (2005). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*, 79(2), 140-158.
7. Wong, P. W., Shimoda, Y., Nonaka, M., Inoue, M., & Mizuno, M. (2008). Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. *Renewable energy*, 33(5), 1024-1036.
8. Doulos, L., Tsangrassoulis, A., & Topalis, F. (2008). Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts. *Energy and Buildings*, 40(1), 36-50.
9. Atif, M. R., & Galasiu, A. D. (2003). Energy performance of daylight-linked automatic lighting control systems in large atrium spaces: report on two field-monitored case studies. *Energy and Buildings*, 35(5), 441-461.
10. Darwich Soliva, A., & Fernández Domínguez, P. (2006). Estudio de los factores ambientales en bibliotecas públicas de Barcelona y su influencia en la percepción por los usuarios. Proyecto final de carrera Ingeniería Industrial. Escuela de Ingenieros Industriales de Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya.





11. Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría del Trabajo y Previsión Social.
12. Norma española UNE-EN 12464-1. (2003) Norma europea sobre la iluminación para interiores.
13. Secretaría de energía (2015) Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029.
14. Ghisi, E., & Tinker, J. A. (2005). An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. *Building and Environment*, 40(1), 51-61.
15. Nikolaou, T., Kolokotsa, D. & Stavrakakis, G. (2004) Introduction to Intelligent Buildings, in *A Handbook for Intelligent Buildings*. SMART Accelerate, Athens, Greece.
16. Passino, K.M., Yurkovich, S. & Reinfrank, M. (1998) *Fuzzy Control* (Vol. 20). Menlo Park, CA: Addison-Wesley.
17. Kolokotsa, D., Niachou, K., Geros, V., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G. S., & Santamouris, M. (2005). Implementation of an integrated indoor environment and energy management system. *Energy and Buildings*, 37(1), 93-99.

