



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Instrumentación y Control Automático



DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES PARA CONTROL DE ILUMINACIÓN BASADO EN
LÓGICA DIFUSA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias con línea terminal en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Claudia Aide González Cruz

Dirigido por:

Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza

SINODALES

Dr. Edgar A. Rivas Araiza
Presidente

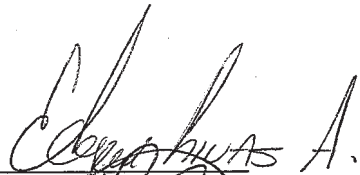
M.C. Ricardo Luna Rubio
Secretario

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz
Vocal

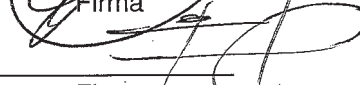
Dr. Manuel Toledano Ayala
Suplente


M.C. Alfonso Noriega Ponce
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Febrero de 2012
México

RESUMEN

Hoy en día, las exigencias de un desarrollo sustentable nos llevan a desarrollar sistemas que garanticen la satisfacción de nuestras necesidades con un máximo aprovechamiento y cuidado del medio ambiente. Este documento presenta el diseño e implementación de un sistema inteligente para control de iluminación basado en una red de sensores lumínicos, que permite priorizar el uso de la iluminación natural y disminuir el consumo de luz artificial, además de brindar condiciones de confort visual para los usuarios. El sistema implementado, funciona bajo el modo maestro-esclavo por medio de una interfaz gráfica que permite consultar variables y controlar las luminarias por grupos o de manera individual; además ofrece dos modos de operación: convencional y automático, el primero hace analogía al uso de interruptores y atenuadores de iluminación, el segundo emplea una técnica de control inteligente para regular la luz ambiental. El intercambio de datos entre los componentes del sistema se lleva a cabo mediante un protocolo de comunicación transmitido a través de módulos inalámbricos. La regulación de la potencia que los balastos entregan a las lámparas para variar el flujo luminoso, se logra mediante el uso de un controlador basado en lógica difusa, con funciones de membresía triangulares y trapezoidales en sus variables de entrada y salida, el criterio máximo del mínimo como mecanismo de inferencias y el método promedio de centros como defuzificador. Las pruebas realizadas al sistema se llevaron a cabo en un edificio con actividades educativas. Los resultados obtenidos muestran el correcto funcionamiento del sistema al lograr un 95% de éxito en la comunicación de la red, un ahorro de energía eléctrica de 36.98% a 69.74% al activar el controlador difuso y un máximo ahorro de energía de 74% al establecer escenas de iluminación predefinidas en la interfaz gráfica de usuario. El nivel de iluminación establecido como referencia al controlador, es alcanzado de forma gradual y en un tiempo de 3 a 5.4 segundos dependiendo de la amplitud del escalón.

(Palabras claves: Control difuso, Red de sensores, Red de actuadores, Confort visual, Ahorro energético).

SUMMARY

Today, the demands of sustainable development lead us to develop systems that ensure the satisfaction of our needs with a maximum utilization and environmental care. This paper presents the design and implementation of an intelligent system for lighting control based on a network of light sensors. This intelligent system prioritize the use of natural lighting and reduces the use of artificial light as well as providing visual comfort conditions for users. The implemented system works under the master-slave mode via a graphical interface. This interface allows to monitor the variables and to control the luminaries in groups or individually. Furthermore, it offers two operation modes: conventional and automatic. The former resembles the use of lighting switches and dimmers. The latter uses an intelligent control technique to regulate the ambient light. The exchange of data among system components is carried out through a communication protocol transmitted via wireless modules. The regulation power, which is delivered by the ballast to the lamps for varying the luminous flux, is obtained by using a controller based on fuzzy logic which uses triangular and trapezoidal membership functions in its input and output variables. The criterion of maximum-minimum as inference mechanism and center average method was used for defuzzificator. The system tests were carried out in a building with educational activities. The results show the proper functioning of the system to achieve 95% of effectiveness in the network communication, from 36.98% to 69.47% of electrical energy saving using the fuzzy controller, and 74% of energy saving when lighting scenes predefined in the graphical interface are set. The lighting level established as a reference for the controller was achieved gradually, in 3 to 5.4 seconds depending on the step amplitude.

(Keywords: Fuzzy control, Sensor Network, Actuator network, Visual Comfort, Energy saving).

DEDICATORIAS

**A dios, a la memoria de mi madre
Josefina López Rivera,
A mi hermano Misael I. López Rivera**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco **al creador del universo** por permitirme terminar con esta etapa de mi vida, por todo lo que he visto, oído y recibido durante estos años de estudio. Gracias por la vida y por estar conmigo en todo momento.

Quiero expresar mi reconocimiento y gratitud a mi director de tesis **Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza** por su tiempo y dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Y de manera muy especial al **M.C. Ricardo Luna Rubio** y al **Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz** por su valioso apoyo durante la ejecución de esta investigación, por su guía y los consejos brindados. A mis sinodales **Dr. Manuel Toledano Ayala** y **M.C. Alfonso Noriega Ponce** por sus comentarios y el tiempo dedicado al presente trabajo.

Al **Dr. Gilberto Herrera Ruiz** por su apoyo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento brindado para la realización de mis estudios de maestría.

A mi hermano **Misael Ignacio López Rivera** quien me ha apoyado en todo momento, por sus consejos y el inmenso apoyo moral que siempre me ha brindado. A mis hermanos **Miguel Angel, Rosa María, Josefina** y **Luis Alberto** por los ánimos para seguir siempre adelante.

A mis amigos **Celso Guillermo García Díaz, Manuel Alejandro Zamora Vásquez, Miguel A. González, Daniel Pérez Canales, Perla J. Lázaro** y **Tania Dorantes** por brindarme su amistad y compartir conmigo momentos mas allá de las aulas de estudio. A mis amigos y **compañeros de generación** de la maestría por sus comentarios y observaciones hacia mi trabajo.

De manera especial agradezco la colaboración de **Rafael Guadalupe Chavez Moreno, Aleph Hain Pacheco Estrada y Carlos Duarte Galván** por su apoyo en diferentes etapas de la realización de este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Panorama general de la iluminación	1
1.2 Justificación	2
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Hipótesis	7
1.5 Objetivo general	7
1.6 Objetivos específicos	7
II. REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1 Fundamentación Teórica	9
2.1.1 La luz y la visión	9
2.1.2 Unidades de iluminación	11
2.1.2.1 Flujo luminoso	11
2.1.2.2 Iluminación o iluminancia	12
2.1.2.3 Intensidad luminosa	12
2.1.2.4 Eficacia luminosa	12
2.1.2.5 Deslumbramiento	13
2.1.2.6 Color de la luz	13
2.1.2.7 Confort visual	13
2.1.3 Componentes de un sistema de iluminación	14
2.1.3.1 Luminaria	14
2.1.3.2 Lámpara fluorescente	15
2.1.3.3 Balastos electrónicos	16
2.1.4 Sistemas de control de iluminación en Edificios Inteligentes	17
2.1.5 Control basado en lógica difusa	18

2.1.6	Controlador difuso.....	18
2.1.6.1	Fuzificación	19
2.1.6.2	Base de conocimiento	21
2.1.6.3	Máquina de inferencias	21
2.1.6.4	Defuzificación	22
2.1.7	Red de sensores.....	23
2.1.8	Protocolos de comunicación utilizados en sistemas de iluminación	25
2.1.8.1	Protocolo de comunicación DALI	25
2.1.8.2	Protocolo de comunicación DMX512.....	27
2.1.8.3	Protocolo de comunicación KNX.....	27
2.1.8.4	Protocolo de comunicación LON.....	28
2.2	Estado del arte	28
2.2.1	Evolución de los sistemas de iluminación.....	28
2.2.2	Sistemas basados en detección de ocupantes	31
2.2.3	Sistemas de control clásico.....	31
2.2.4	Sistemas basados en lógica difusa.....	32
2.2.5	Redes de sensores en los sistemas de iluminación.....	33
2.2.6	Sistemas de administración de energía	35
2.2.6.1	Uso de protocolos de comunicación.....	36
2.2.7	Métodos de control	38
III.	METODOLOGÍA.....	40
3.1	Panorama general del proyecto	40
3.2	Recursos y materiales empleados	44
3.2.1	Lámparas	44
3.2.2	Balastos	44
3.2.3	Sensor de iluminación.....	46
3.2.4	Microcontrolador	48
3.2.5	Módulo de comunicación inalámbrica	48
3.2.6	Instrumento patrón	50
3.3	Descripción del área de estudio	51
3.3.1	Monitoreo del consumo de energía.....	53
3.3.2	Cuantificación de niveles de iluminación	54
3.4	Diseño del controlador.....	57
3.5	Validación del controlador	61

3.6	Protocolo de comunicación del Sistema.....	65
3.6.1	Dirección.....	66
3.6.2	Comando y valor.....	67
3.6.2.1	Escenas de iluminación.....	69
3.7	Incorporación del sistema en hardware.....	69
3.8	Validación del amplificador de voltaje.....	72
3.9	Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).....	73
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
4.1	Implementación y funcionamiento del SICI.....	77
4.2	Operación del sistema en modo de control convencional.....	78
4.2.1	Consumo de energía eléctrica.....	79
4.2.2	Iluminancia en el área de trabajo.....	83
4.3	Operación del sistema en modo de control automático.....	84
4.3.1	Iluminancia en el área de trabajo.....	85
4.3.2	Consumo de energía eléctrica.....	86
V.	CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS.....	91
	LITERATURA CITADA.....	94
	APÉNDICES.....	99
A.1.	Listado de algoritmos programados en el microcontrolador para el SICI desarrollado.....	99
A.2.	Diagrama eléctrico del módulo SNLC-SX.....	110
A.3.	Pantallas de la GUI para operación del SICI.....	111
	ANEXOS.....	113
	Anexo 1. Participación en 5to. Coloquio de Investigación de la UAQ. Publicación de artículo en el 7° Congreso de Ingeniería de la UAQ.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Comparación de diferentes métodos de defuzificación (LabView, PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual; National Instruments, 2009).....	23
Tabla 2. 2. Características de algunos protocolos de comunicación estándares para sistemas de control de iluminación.....	29
Tabla 3. 1. Comandos AT utilizados en el diseño de la red de sensores para monitoreo de variables.....	50
Tabla 3. 2. Niveles de iluminación para edificios educativos. Fuente: Norma UNE-EN 12464-1.	52
Tabla 3. 3. Base de conocimiento del controlador.	60
Tabla 3. 4. Modo de operación y transmisión de los comandos del SICI.....	67
Tabla 3. 5. Descripción de los comandos establecidos en el protocolo de comunicación del SICI.	68
Tabla 3. 6. Valores predeterminados para las escenas de iluminación.	69
Tabla 4. 1. Consumo de energía eléctrica (EE) del sistema, para diferentes señales de control aplicadas.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Longitudes de onda de la luz y rango del espectro electromagnético visible para el ojo humano.	10
Figura 2. 2. Elementos y principio de funcionamiento de una lámpara fluorescente.....	15
Figura 2. 3. Esquema típico de un balastro electrónico de dos etapas.	17
Figura 2. 4. Principio de funcionamiento de un sistema de control difuso.....	19
Figura 2. 5. Tipos de fuzificadores: a) Triangular, b) Trapezoidal, c) Singleton, d) Gaussiano.....	19
Figura 2. 6. Fuzificación de la variable x en los conjuntos difusos bajo, medio, alto.....	21
Figura 2. 7. Arquitectura común de una red de sensores inalámbrica punto-multipunto o tipo estrella.	24
Figura 2. 8. Estructura de datos del protocolo de comunicación estándar DALI.	26
Figura 2. 9. Flujo del controlador de iluminación implementado por Wang y Wang, 2009.....	35
Figura 3. 1. Componentes básicos del SICI: módulo maestro, módulos esclavos y planta (balastro y lámparas fluorescentes).....	41
Figura 3. 2. Elementos principales y esquema de funcionamiento general del SICI.	43
Figura 3. 3. a) Balastro electrónico regulable SLI 8137, b) Diagrama de conexiones para dos lámparas.	45
Figura 3. 4. Desempeño del balastro al incrementar la señal de control: a) Consumo de corriente del balastro, b) Nivel de iluminación en el área de trabajo debido a la variación de flujo luminoso de la lámpara.....	45
Figura 3. 5. Sensibilidad espectral relativa de un foto-sensor estándar de silicio (Si) y el SFH 5711 de OSRAM comparado con la sensibilidad del ojo humano. (OSRAM, 2006).....	46

Figura 3. 6. Corriente de salida $I_{out}[\mu A]$ del SFH 5711 contra la iluminancia $E_v[lux]$. (OSRAM, 2006).....	47
Figura 3. 7. Conexión típica del SFH5711, para detectar la iluminación ambiental a partir de su salida logarítmica (Osram, 2006).....	47
Figura 3. 8. Filtro pasa bajas: a) Respuesta en frecuencia, b) Circuito de primer orden pasivo.	48
Figura 3. 9. a) Vista superior del lado izquierdo de la planta alta del CEDIT, b) Vista interior del área de trabajo.	51
Figura 3. 10. Componentes de los nodos a) esclavos y b) coordinador, de la red de sensores para monitoreo de variables lumínicas en el espacio de trabajo.....	54
Figura 3. 11. Ejemplos de estructura de datos API: a) estructura para leer el estado de las entradas analógicas y digitales de un módulo remoto, b) estructura de respuesta del módulo remoto.....	56
Figura 3. 12. Distribución de sensores en área de trabajo, para monitoreo de niveles de iluminación.	56
Figura 3. 13. Comportamiento de la iluminación natural en el interior del CEDIT, sin el uso del SICL.....	57
Figura 3. 14. Diagrama a bloques del controlador difuso propuesto para el SICL.	58
Figura 3. 15. Elementos del controlador difuso propuesto y su flujo de información.....	58
Figura 3. 16. Funciones de membresía para la variable de entrada <i>error</i>	59
Figura 3. 17. Funciones de membresía para la variable de entrada <i>pendiente</i>	59
Figura 3. 18. Funciones de membresía para la variable de salida del controlador: <i>Nivel de VCD</i>	59
Figura 3. 19. Superficie de control generada en MatLab a partir de los conjuntos difusos y la base de reglas del controlador difuso propuesto	61
Figura 3. 20. Esquema y líneas de flujo del sistema para la validación del controlador de iluminación difuso.	62
Figura 3. 21. Implementación física del sistema para la validación del controlador.	63

Figura 3. 22. Respuesta del módulo SNLC-S1 a diferentes valores de referencia.	64
Figura 3. 23. Señal de control aplicada al módulo SNLC-S1 y señal de control para 1- encender/ 0-apagar las luminarias.	65
Figura 3. 24. Estructuras de datos del protocolo de comunicación para el intercambio de información entre los nodos del SICl.	65
Figura 3. 25. Hardware implementado para los nodos esclavos y maestro del sistema de control de iluminación.	70
Figura 3. 26. Comparación entre el voltaje ideal PWM, el voltaje PWM real a la salida del microcontrolador y el voltaje real después del seguidor.	72
Figura 3. 27. Comparación entre la señal de control analógica ideal generada a partir del voltaje PWM del microcontrolador (0-5 VCD) y el voltaje real a la salida del amplificador (0-10 VCD).	73
Figura 3. 28. Opciones disponibles en la GUI para el modo de operación convencional.	74
Figura 3. 29. Opciones disponibles en la GUI para el modo de operación automático.	74
Figura 3. 30. Diagrama de flujo de información en la programación de la GUI para el envío de comandos a los módulos esclavos (SNLC-SX).	76
Figura 4. 1. Instalación e implementación física del SICl. a) Instalación física de los componentes del sistema, b) Elementos principales del módulo esclavo SNLC-S1.	77
Figura 4. 2. Respuesta del sistema a comandos de control convencional: a) encender, b) apagar, c) escena 1, d) escena 3, e) escena 6 y f) escena 10.	78
Figura 4. 3. Consumo de potencia activa y potencia aparente al variar la señal de control del balastro de 10 a 1 VCD.	79
Figura 4. 4. Factor de potencia del balastro al variar la señal de control de 10 a 1 VCD.	80
Figura 4. 5. Corriente consumida por el balastro al variar la señal de control de 10 a 1 VCD.	81

Figura 4. 6. Tensión de línea al variar la señal de control de 10 a 1 VCD.	81
Figura 4. 7. Comparación entre el consumo de energía del balastro operando al 100% de su capacidad y el consumo en cada escena de iluminación.....	82
Figura 4. 8. Porcentaje de regulación del flujo luminoso de las lámparas al variar la señal de control de 10 a 1 VCD e iluminancia medida en el área de trabajo.....	83
Figura 4. 9. Ubicación de los nodos esclavos y maestro dentro del espacio de trabajo.....	84
Figura 4. 10. Nivel de iluminancia en el plano de trabajo del SNLC-S1.....	85
Figura 4. 11. Nivel de iluminación en el plano de trabajo del SNLC-S2.....	86
Figura 4. 12. Potencia activa y aparente para SNLC-S1.....	87
Figura 4. 13. Consumo de corriente del nodo SNLC-S1 operando en modo de control automático.....	87
Figura 4. 14. Voltaje de línea del nodo SNLC-S1 al operar en modo de control automático.....	88
Figura 4. 15. Potencia activa y aparente para SNLC-S2.....	88
Figura 4. 16. Consumo de corriente del nodo SNLC-S1 operando en modo de control automático.....	89
Figura 4. 17. Voltaje de línea del nodo SNLC-S1 al operar en modo de control automático.....	89
Figura 4. 18. Consumo de energía del sistema operando en modo de control automático y su consumo nominal.	90

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Panorama general de la iluminación

El sistema de iluminación (SI), junto con el térmico y el acústico, forma parte del ambiente global en los espacios interiores, cada uno de ellos influye en el proceso de intercambio energético entre el individuo y su hábitat a través del espacio construido (Kolokotsa *et al.*, 2006; Dounis *et al.*, 2011). La iluminación es fundamental para que el ser humano pueda interactuar con el medio que lo rodea, mediante la información recibida a través del proceso visual.

La visión depende de aspectos como la sensibilidad y la agudeza visual de cada individuo, la forma y el tamaño del objeto, la inercia visual, el tiempo y la velocidad de percepción, entre otros; la iluminación facilita la visión, de manera que, para desarrollar las tareas de una forma eficaz, correcta, segura y saludable, se necesita que la luz y la visión se complementen.

Investigaciones médicas y biológicas en seres humanos, han demostrado que la luz que entra por los ojos, además de un efecto visual tiene otros efectos biológicos importantes en el cuerpo. Una buena iluminación tiene una influencia positiva en la salud, el bienestar, el estado de alerta, el ritmo circadiano, el ánimo, el comportamiento e incluso en la calidad del sueño (Bommel, 2006; Webb, 2006). Una iluminación inadecuada pueden causar dolores de cabeza y perjudicar el rendimiento visual (Winterbottom y Wilkins, 2009).

La mejor comprensión obtenida de la diversidad de efectos que la iluminación produce en el ser humano, da como resultado nuevas normas que rigen el diseño de instalación de luminarias, lo que conlleva al desarrollo de sistemas dinámicos. Un SI bien proyectado, proporciona luz suficiente para el

trabajo visual que se realiza, con una visión sostenida y sin fatiga, y luz equilibrada en los alrededores para dar una sensación de comodidad, bienestar y seguridad.

Los edificios, presentan un uso excesivo de luz artificial, por ello, recientemente se han desarrollado sistemas de iluminación inteligentes, que ofrecen la ventaja de controlar por zonas el encendido de las luminarias, es decir, los lugares donde es necesario el uso de luz artificial y el momento cuando ésta es requerida, a fin de reducir el consumo de energía eléctrica hasta en un 50% (Luna-Rubio *et al.*, 2009; Yang y Nam, 2010).

1.2 Justificación

La iluminación artificial es una necesidad de toda la población, y una buena calidad de este servicio proporciona, además de confort, salud visual al ser humano. Por otra parte, el ahorro energético juega un papel importante en la actualidad, no sólo por el alto costo de la energía eléctrica que impacta tanto en la economía familiar como en la industrial, sino porque, a mediano plazo, resulta más económico invertir en un sistema de ahorro energético que mantener un gasto sostenido.

El mundo actual enfrenta serios problemas energéticos, entre los que destacan el declive de las reservas energéticas primarias, el crecimiento poblacional, el aumento en el costo de los recursos energéticos y la amenaza de los efectos del calentamiento global, por mencionar sólo algunos.

Como consecuencia del aumento poblacional y del estilo de vida moderna, en los últimos años se viene afrontando una creciente demanda en el suministro de Energía Eléctrica (EE) y, por ende, un aumento en el uso de las Fuentes de Energía Primaria; en 1973 se consumieron a nivel mundial 6,115

Mtoe¹, mientras que para el 2007, esta cifra fue casi duplicada al alcanzar las 12,029 Mtoe. Datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, International Energy Agency) señalan que, en el 2007, la producción total de EE fue de 19,771 TWh, de los cuales el 68% fue generado mediante la quema de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural (IEA, 2009b).

El uso de la EE por sector se distribuye de la siguiente manera (IEA, 2009b): de 439 Mtoe consumidas en 1973, el 53.4% correspondía al sector industrial, 2.4% al sector transportes y 44.2% a los sectores doméstico, agrícola, de servicios, entre otros; en el 2007, la participación de cada sector en el consumo total de 1,414 Mtoe fue del 42.2%, 1.6% y 56.2% respectivamente. La disminución en el consumo de EE del sector industrial y del sector transportes es atribuida al proceso de globalización económica que exige a las empresas redefinir sus estrategias y procesos, con la finalidad de lograr un uso eficiente de sus recursos y el aumento de su productividad, de modo que puedan competir con éxito en el mercado; caso contrario son los sectores doméstico, agrícola y de servicios, puesto que consumen mayor porcentaje de EE en los últimos años, debido a que sus estrategias de ahorro y eficiencia energética aún están en desarrollo.

El uso de combustibles fósiles en la generación de energía produce anualmente millones de gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global (Bergmann *et al.*, 2006; Muller-Furstenberger *et al.*, 2007; Omer, 2008). El Anuario Estadístico de Energía 2011 de la base de datos Internacional Enerdata indica que México ocupa el décimo cuarto lugar entre las naciones que perjudican con la emisión de gases de efecto invernadero, al producir 423 millones de toneladas de CO₂ en 2010, mientras que China encabeza esta lista al producir 7,366 millones de toneladas del mismo gas.

¹ Mtoe = Millones de toneladas equivalentes de petróleo (1 Mtoe = 11,630 GWh = 3.968 X 10⁷ MBtu = 10⁷ Gcal = 4.1868 X 10⁴ TJ).

En los últimos años en casi todas las regiones del mundo el costo de los combustibles fósiles ha aumentado, afectando directamente los costos de generación de la EE que proviene de éstos.

Al igual que en el resto del mundo, en nuestro país el declive de las reservas energéticas primarias y las emisiones de gases de efecto invernadero son una problemática real (PEP, 2009). El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 estima que en 2002 México generó el equivalente a 643,183 millones de toneladas de CO₂, volumen que lo situó dentro de los 15 principales países emisores, con una generación de alrededor de 1.5% de las emisiones globales para ese año.

En lo que respecta a las fuentes responsables de emisiones, 61% corresponde al sector energético; 7% a los procesos industriales; 14% al cambio de uso de suelo (deforestación); 8% a la agricultura y 10% a la descomposición de residuos orgánicos. Dentro del sector energético en particular, la generación de electricidad representa el 24% de las emisiones; mientras que los sectores comercial, residencial y agrícola son responsables del 5% (PND, 2011).

En México el sector eléctrico está comprendido por una sola empresa de propiedad nacional, Comisión Federal de Electricidad (CFE), encargada de la generación, transmisión y distribución de energía en todo el país. CFE proporciona su servicio a 33.9 millones de clientes, de los cuales el 88.4% pertenece al sector doméstico, 0.34% al sector agrícola, 0.72% al sector industrial, 10.01% al sector comercial y 0.52% al sector servicios (CFE, 2011).

CFE basa el 50.85% de la generación total de energía eléctrica en el uso de combustibles fósiles, el 16.27% proviene de fuentes como la energía hidráulica, nuclear, geotérmica y eólica, y el 32.87% restante es generado por productores independientes. Si bien, se califica a CFE como una empresa de clase mundial, ésta también enfrenta el problema del incremento en el precio de los combustibles

fósiles que, aunado a los costos de construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura eléctrica, impacta en los costos de generación de energía.

Las medidas de ahorro de energía benefician a la industria eléctrica toda vez que contribuyen a disminuir la carga del sistema eléctrico; de manera que ésta enfrenta una menor presión en el crecimiento de su infraestructura de generación, transmisión y distribución. Obteniendo como resultado ahorros importantes en materia de inversión y operación, que se traducen en menores costos de suministro, siempre y cuando las medidas de ahorro de energía tengan un carácter permanente.

Una solución conjunta a las necesidades de confort del ser humano, ahorro de energía y cuidado ambiental, es implementada en los llamados Edificios Inteligentes, en los cuales es posible controlar, de forma automática, aunque también manual, todos aquellos dispositivos de uso diario, como son los sistemas de seguridad, los dispositivos de iluminación, aire acondicionado, audio, entre otros (Wong *et al.*, 2005).

El proyecto propuesto tiene como objetivo reducir el consumo de la energía eléctrica por concepto de iluminación en edificios, al implementar un sistema de control basado en lógica difusa, que optimiza el uso de la iluminación natural.

1.3 Planteamiento del problema

Diversas investigaciones estiman que 20 a 40% del consumo de electricidad en edificios no domésticos se debe a los sistemas de iluminación. (Li *et al.*, 2006; Jenkins and Newborough, 2007). Aunado a esto, la búsqueda de un desarrollo sustentable ha revivido el interés por el aprovechamiento de fuentes naturales para lograr un máximo confort dentro de un edificio (Luna-Rubio *et al.*,

2012), dando como resultado el concepto de arquitectura bioclimática. Este tipo de arquitectura consiste en el diseño de espacios interiores que aprovechan las condiciones climáticas del entorno para lograr un máximo confort dentro del edificio, con el mínimo gasto energético. Y complementando la demanda de energía con fuentes renovables.

En el diseño bioclimático se toman en consideración características del lugar como la orientación, el sol, el viento, la vegetación, la topografía, las construcciones adyacentes, entre otras. En particular, la radiación solar es aprovechada para calentamiento pasivo, calentamiento activo, fuente de energía fotovoltaica y fuente de iluminación natural.

Desafortunadamente la luz solar es una fuente dinámica en la que las variaciones dependen de factores como la estación del año, localización y orientación geográfica, nubosidad, entre otros, lo que hace difícil la obtención de su modelo matemático (Hu and Olbina, 2011). A razón de lo anterior los sistemas de control tradicionales basados en modelos matemáticos e implementaciones frecuentes como controladores PID han mostrado limitantes en el control de la energía para la iluminación natural (Ciker *et al.*, 2007; Paris *et al.*, 2011).

El control difuso ha sido una solución más conveniente para problemas que no pueden ser representados fácilmente mediante modelado matemático. Esto debido a que se basa en una serie de inferencias lógicas establecidas por la experiencia humana, lo cual, resulta en ocasiones más efectivo que las técnicas de control clásico cuando no se dispone de una función matemática para representar la dinámica de la planta a controlar.

Se debe realizar una adecuada selección del dispositivo sensor, ya que de éste depende la toma de la acción de control que garantice una salida correcta del sistema. Por último, la compatibilidad de los componentes del sistema de

control de iluminación debe ser asegurada, a fin de garantizar que cada uno de ellos funcione adecuadamente bajo las mismas condiciones de operación. Y obtener así, un diseño final útil que además ofrezca facilidad y comodidad de uso.

1.4 Hipótesis

Una red inalámbrica de sensores habilita el intercambio de datos (variables lumínicas) de manera rápida y eficaz entre sus nodos a través de un protocolo de comunicación, lo que permite interactuar a un sistema de iluminación de manera coordinada dentro de un esquema de control inteligente, y obtener así ahorro potencial de energía eléctrica y confort visual de los usuarios.

1.5 Objetivo general

Diseñar un Sistema de Control de Iluminación Inteligente para interiores de edificios usando una red de sensores, que asegure el confort visual de los usuarios y permita disminuir el consumo de la energía eléctrica en un 30% al optimizar el uso de la iluminación natural.

1.6 Objetivos específicos

- Diseñar, validar e implementar basándonos en lógica difusa, un controlador inteligente de iluminación que optimice el uso de la luz natural.
- Diseñar una red de sensores para monitorear el nivel de iluminación en un espacio determinado, utilizando módulos de comunicación inalámbrica.
- Implementar un sistema inteligente de control de iluminación que mediante la topología maestro-esclavo, permita establecer los

parámetros para regular en tiempo real el nivel de iluminación en el área de trabajo.

- Diseñar una interfaz gráfica de usuario que permita operar el sistema y consultar variables lumínicas.
- Calcular la rentabilidad y determinar la funcionalidad del sistema.

El presente trabajo de tesis consiste en el diseño de un controlador difuso y una red de sensores para sistemas de iluminación que utilizan lámparas fluorescentes. Para la transferencia de información dentro de la red, se presenta el diseño de un protocolo de comunicación que permite la manipulación del sistema. De esta manera, se busca sean logradas las condiciones de confort visual de los ocupantes y se disminuya el uso de la energía eléctrica al aprovechar la iluminación natural.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo se divide en dos apartados: fundamentación teórica y estudio del estado del arte del tema de investigación. Como parte del primero, se expone, de manera breve, una serie de conceptos que sirven de apoyo al lector para una correcta comprensión del presente trabajo. En el segundo apartado, se presenta una revisión sobre los antecedentes más relevantes y tecnologías empleadas en los sistemas automáticos de control de iluminación. Al final de este apartado, se hace una comparación basada en los resultados obtenidos de los artículos de investigación citados.

2.1 Fundamentación Teórica

2.1.1 La luz y la visión

La definición de la luz, dada por la OSA (Optical Society of America) se expresa en los siguientes términos: "La luz es aquel aspecto de la energía radiante que un observador humano percibe a través de las sensaciones visuales producidas por el estímulo de la retina del ojo".

Técnicamente, la luz es una forma particular y concreta que se propaga por medio de radiaciones, es decir por medio de perturbaciones electromagnéticas del espacio. Un término más particular, define la luz como la parte del espectro electromagnético que puede ser percibida por el ojo humano. Debido a que hay un gran número de radiaciones electromagnéticas es posible clasificarlas en función a la forma en que se generan, la forma en que se manifiestan, por su naturaleza, dependencia temporal, etc. La clasificación más utilizada es mediante las longitudes de onda (Figura 2.1). Cada fuente emite radiaciones en diversas frecuencias o longitudes de onda, que son representadas por histogramas. A cada

longitud de onda corresponde un color. Las radiaciones visibles por el ser humano, es decir, el espectro visible, ocupan un rango de valores muy estrecho comprendido entre 380 y 780nm. En los extremos del espectro la visibilidad es baja, y es máxima en 555nm (Webb, 2006).

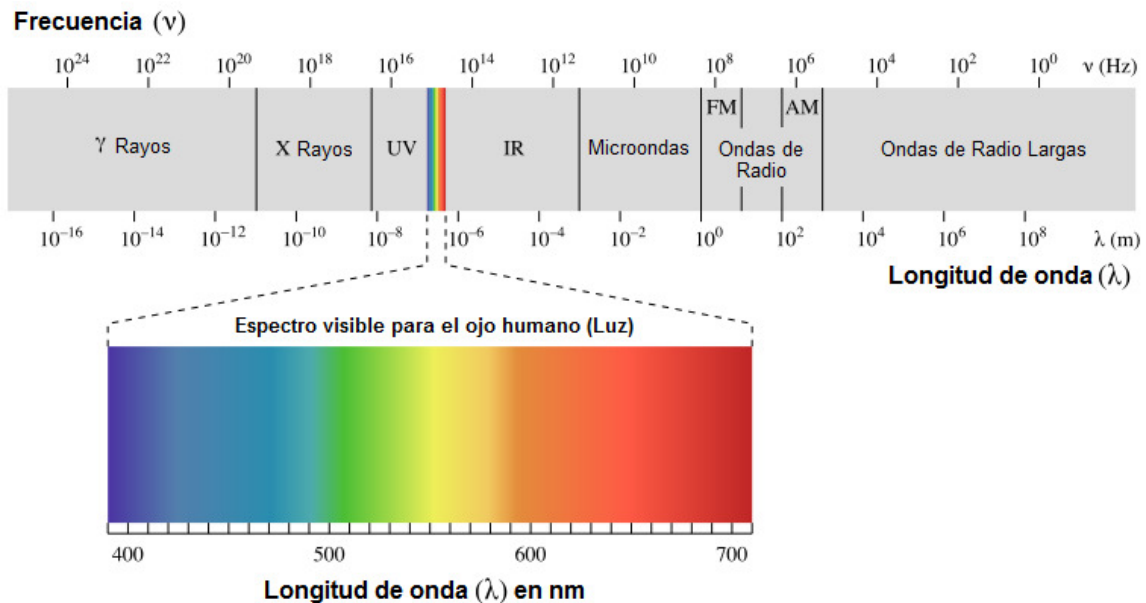


Figura 2. 1. Longitudes de onda de la luz y rango del espectro electromagnético visible para el ojo humano.

En relación a la visión se debe tener en cuenta aspectos como la sensibilidad, la agudeza visual y el campo visual, entre otros como la forma y el tamaño del objeto, la inercia visual, el tiempo y la velocidad de percepción.

La *sensibilidad* es el aspecto más importante en relación a la visión y varía de un individuo a otro; va de la mano con el contraste, de manera que la visión se facilita si se aumenta el contraste y el nivel de iluminación por encima del valor del umbral definido por la sensibilidad de contraste del ojo.

Agudeza visual o *nitidez de visión*, cualitativamente es la capacidad para distinguir objetos que están muy cerca entre sí, cuantitativamente es el valor

recíproco de la separación angular de dos objetos adyacentes que el ojo apenas puede distinguir que están separados. De esta manera la agudeza visual mide el detalle más pequeño que puede percibirse y depende del nivel de iluminación, aumenta cuando la luz también aumenta.

El *campo visual* es la parte del entorno percibida mediante los ojos cuando estos y la cabeza están fijos; dicho plano se extiende 180° en el plano horizontal; 130° en el plano vertical, 60° por encima y 70° por debajo del plano horizontal.

2.1.2 Unidades de iluminación

Las unidades de iluminación, como el *flujo luminoso*, la *iluminancia*, la *intensidad luminosa*, y la *eficacia luminosa*, se utilizan para medir algunas magnitudes la luz; otros parámetros, como el *deslumbramiento*, el *contraste*, el *color de la luz*, y nuevamente la *iluminancia*, entre otros, sirven para evaluar el confort visual. A continuación su descripción.

2.1.2.1 Flujo luminoso

El flujo luminoso es la cantidad de energía radiante emitida en el espacio por una fuente luminosa en la unidad de tiempo.

$$\phi = \frac{Q}{t} \quad (2.1)$$

Donde:

ϕ : Flujo luminoso en lúmenes (*lm*).

Q : Cantidad de luz emitida en lúmenes por segundo (*lm*s*).

t : Tiempo de duración de la emisión en segundos (*s*).

2.1.2.2 Iluminación o iluminancia

Iluminación es la relación de flujo luminoso incidente en una superficie por unidad de área, expresada en luxes.

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (2.2)$$

Donde:

E : Iluminación o iluminancia en lux (lx). $1 lx = 1 lm/m^2$

ϕ : Flujo luminoso que incide sobre la superficie (lm).

t : Área afectada por el flujo luminoso (m^2).

2.1.2.3 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa es la parte del flujo emitido por una fuente lumínica en una dirección dada por el ángulo sólido que lo contiene. Su unidad de medida es la candela (cd).

2.1.2.4 Eficacia luminosa

La eficacia luminosa es la relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente y la potencia empleada para obtener tal flujo.

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (2.3)$$

Donde:

η : Eficacia luminosa en lúmenes por vatio (lm/W).

ϕ : Flujo luminoso emitido por la fuente en lúmenes (lm).

P : Potencia eléctrica consumida por la lámpara en vatios (W).

2.1.2.5 Deslumbramiento

El deslumbramiento es la sensación producida por áreas brillantes dentro del campo de visión y puede ser experimentado bien como deslumbramiento molesto o perturbador. En lugares de trabajo interiores, el deslumbramiento molesto puede producirse directamente a partir de luminarias brillantes o ventanas. El deslumbramiento causado por las reflexiones en superficies especulares es usualmente conocido como reflexiones de velo o deslumbramiento reflejado.

2.1.2.6 Color de la luz

Se basa en dos conceptos: la Temperatura de color (T_c), que expresa el color de una fuente de luz, comparándola con la luz emitida por un cuerpo negro a una temperatura determinada (en K) y el índice de rendimiento de color (IRC), que relaciona porcentualmente por comparación con una fuente de luz perfecta, la reproducción del color de los objetos. A mayor porcentaje de IRC, mayor será el nivel de reproducción de color. Valores superiores al 85% del IRC son adecuados para espacios donde el color es importante concordando con T_c superiores a 4,500 K. Mientras que niveles inferiores de 70% de IRC se utilizan para espacios donde el reconocimiento cromático es poco importante.

2.1.2.7 Confort visual

El confort visual es el conjunto de características que nos hacen ver bien, con el menor esfuerzo posible, asociándose por tanto con el tener una cantidad de luz adecuada para la actividad a realizar. Los principales parámetros que un

sistema de iluminación debe reunir para proporcionar las condiciones necesarias de confort visual son las siguientes:

- a) Iluminación uniforme y óptima.
- b) Ausencia de brillos deslumbrantes.
- c) Condiciones de contraste adecuadas.
- d) Colores correctos.
- e) Ausencia de luces intermitentes.

De los anteriores parámetros sólo el primero se puede controlar dependiendo de la actividad a realizar en el área de trabajo, mientras que el resto se debe establecer previo al inicio de la construcción del inmueble, y como resultado de la colaboración entre arquitectos y diseñadores de iluminación. Además el nivel de iluminancia resulta la variable mas apropiada para medir cuantitativamente el confort visual, los otros parámetros son fuertemente subjetivos y difíciles de medir (Cheung and Chung, 2008).

El nivel de iluminación óptimo para una tarea determinada corresponde al que da como resultado un mayor rendimiento con una mínima fatiga, sus valores numéricos van en función al requerimiento de las tareas a realizar y también a la posibilidad de poder proporcionar un mayor nivel. Para su estandarización se han creado normas en las que se listan los niveles de iluminación correspondientes a diversas actividades; en México la Ley Federal del Trabajo es la encargada de regular dichos niveles, internacionalmente una de las normas que se tienen con este mismo objeto es la Norma Europea UNE EN12464-1, utilizada como referencia para el desarrollo del proyecto.

2.1.3 Componentes de un sistema de iluminación

2.1.3.1 Luminaria

Es el equipo de iluminación que distribuye, filtra o controla la luz emitida por una lámpara o lámparas. Incluye todos los accesorios necesarios para fijar, proteger y operar las lámparas.

2.1.3.2 Lámpara fluorescente

Es una lámpara de descarga de vapor de mercurio a baja presión; está construida por un tubo de vidrio cubierto en su pared interior con una sustancia fluorescente y un electrodo de tungsteno en cada extremo, en su interior contiene una pequeña gotita de mercurio y un gas inerte a baja presión para ayudar a su encendido (Figura 2.2).

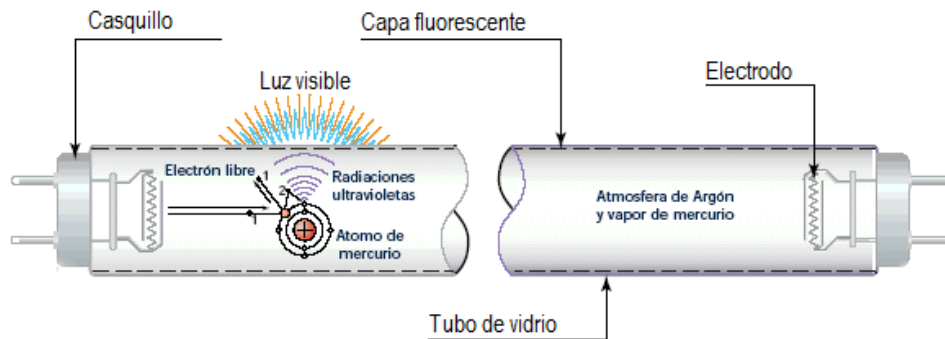


Figura 2. 2. Elementos y principio de funcionamiento de una lámpara fluorescente.

Para iniciar la descarga, se aplica entre los electrodos una tensión lo suficientemente grande para que emitan electrones que son acelerados por el campo magnético creado. En su trayectoria los electrones chocan con los átomos de mercurio, éste proceso puede causar que un electrón perteneciente al átomo de mercurio pase a un nivel de energía superior absorbiendo energía, sin embargo éste es un estado inestable del átomo y el electrón regresa a su órbita natural, liberando el exceso de energía en forma de luz ultravioleta que se convierte en luz visible al pasar a través de la sustancia fluorescente.

Si los electrones de los átomos de mercurio que son bombardeados adquieren la suficiente energía cinética son capaces de convertirse en electrones libres que se añaden a la corriente creada entre los electrodos pudiendo colisionar con otros átomos de mercurio y repetir el proceso anterior. Este proceso en cadena de ionización puede ocasionar una corriente ilimitada a través del tubo de vidrio produciéndose un corto circuito, para evitarlo es necesario que la lámpara se conecte a la línea con una impedancia adicional que limite la corriente a través de ella, dicha impedancia se conoce como balastro.

2.1.3.3 Balastros electrónicos

Un balastro es el sistema de alimentación de las lámparas fluorescentes, su función es proporcionar la tensión necesaria para ionizar el gas de la lámpara durante su encendido y posteriormente, la corriente nominal de operación de la misma. Aunque los primeros balastros desarrollados fueron los electromagnéticos, en la actualidad con los avances en los dispositivos electrónicos los que ofrecen mayor eficiencia y ahorro de energía son los balastros electrónicos, además de que con éstos a diferencia de los primeros es posible controlar la intensidad luminosa (Contenti, 2002).

Físicamente los balastros electrónicos son pequeños, ligeros, silenciosos y no presentan parpadeo en la lámpara debido a que trabajan a altas frecuencias. Su arranque es controlado y cuando son usados con un control de iluminación tienen la posibilidad de ajustar el flujo luminoso de la lámpara. La Figura 2.3 muestra el esquema típico de un balastro electrónico basado en la topología de dos etapas; la primera realiza la corrección del factor de potencia, la segunda opera a la lámpara en alta frecuencia mediante un inversor resonante, el cual al variar su frecuencia de operación ofrece la posibilidad de controlar la intensidad de iluminación de la lámpara (Camargo, 2009).

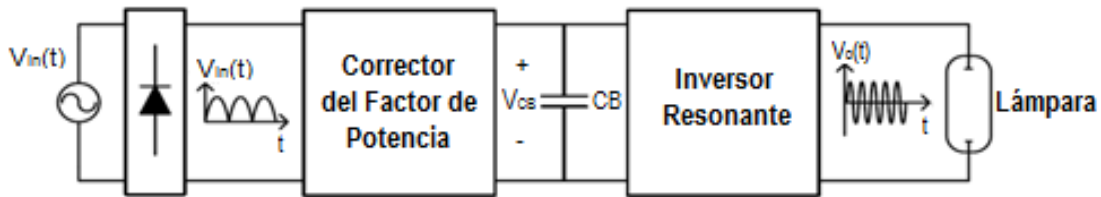


Figura 2. 3. Esquema típico de un balastro electrónico de dos etapas.

2.1.4 Sistemas de control de iluminación en Edificios Inteligentes

Un *edificio inteligente* reúne tecnologías de última generación para mejorar la automatización de espacio, administración de la energía, protección, seguridad y los sistemas de telecomunicaciones (Wong y Li, 2006). Las condiciones de confort en edificios están determinadas por tres factores: el confort térmico, el confort visual y la calidad del aire interior (Dounis y Caraiscos, 2008), donde el *confort visual* es establecido por los niveles de iluminación (medidos en luxes), el deslumbramiento y el color de la luz.

La incorporación de *sistemas de control* en edificios tiene el objetivo de hacer a éstos más confortables y eficientes energéticamente. Un *sistema de control inteligente* consta principalmente de tres componentes: un dispositivo sensor, un circuito lógico y un controlador (Cziker *et al.*, 2007; Dounis y Caraiscos, 2008). El dispositivo sensor se encarga de capturar las mediciones, es decir, detectar los parámetros físicos de interés (*e.g.* el nivel de iluminación) y traducirlos en una señal eléctrica. El circuito lógico se encarga de acondicionar la señal eléctrica del sensor que sirve de entrada al controlador de energía. El controlador actúa sobre los dispositivos a controlar (*e.g.* sobre las lámparas) para alcanzar los objetivos propuestos.

Los *sistemas de control de iluminación* en edificios se clasifican de acuerdo a las siguientes estrategias: detección de ocupantes, programación, sintonización, control de la iluminación natural, respuesta a la demanda y compensación adaptiva (Cziker *et al.*, 2007). En los sistemas de control de iluminación natural la iluminación eléctrica es encendida o apagada en respuesta a la presencia de la luz del día, de manera que se aprovecha éste recurso natural y se logra un ahorro de energía eléctrica. Como se ha mencionado una de las mejores técnicas para control de iluminación natural es el control difuso.

2.1.5 Control basado en lógica difusa

La técnica de *control difuso* es una herramienta poderosa de control no lineal que trata de simular la manera en que el cerebro razona. Ha sido considerada por diferentes investigadores como el mejor método para controlar los sistemas de iluminación, debido a su flexibilidad para permitir los cambios multivariables de la iluminación natural en términos de conjuntos difusos (Mansy, 2004; Lah *et al.*, 2006; Luna-Rubio *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2010). Estos conjuntos se combinan en reglas para definir acciones, de manera que, un sistema de control basado en lógica difusa, combina variables de entrada (definidas en términos de conjuntos difusos) por medio de grupos de reglas de inferencia produciendo uno o varios valores de salida.

A diferencia de un conjunto clásico, un conjunto difuso permite definir una pertenencia parcial de sus elementos determinada por su función de membrecía. Además el controlador difuso ofrece la ventaja de que las reglas de inferencia requeridas se basan en estructuras del tipo “IF... THEN”, las cuales pueden ser implementadas fácilmente en hardware.

2.1.6 Controlador difuso

Al igual que otros controladores, un controlador difuso toma el valor de una o más señales de entrada, las procesa y actúa sobre sus salidas a fin de regular la dinámica de una planta (Figura 2.4). Los elementos que constituyen este tipo de sistemas son: una interfaz de fuzificación de entradas, una máquina de inferencias, una base de conocimiento y una interfaz de defuzificación de las salidas (Shi y Chen, 2007; Luna-Rubio, 2009; Noriega, 2010).

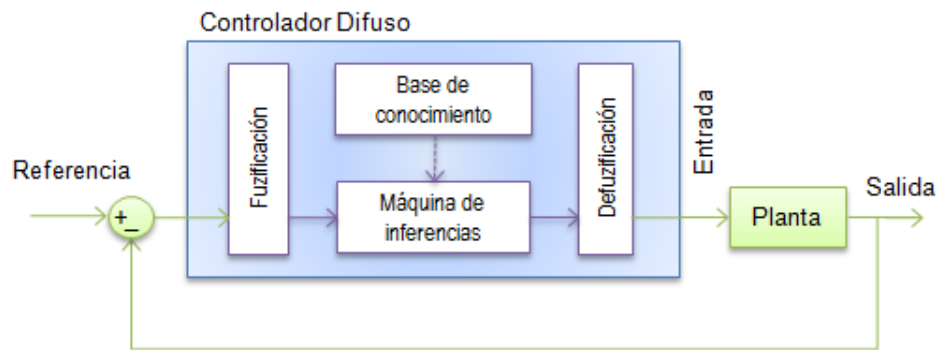


Figura 2. 4. Principio de funcionamiento de un sistema de control difuso.

2.1.6.1 Fuzificación

La fuzificación es el proceso en el que se obtiene el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto difuso, esto es llevado a cabo mediante una función de pertenencia determinada, la cual, puede ser de tipo triangular, trapezoidal, singleton o gaussiana (Figura 2.5).

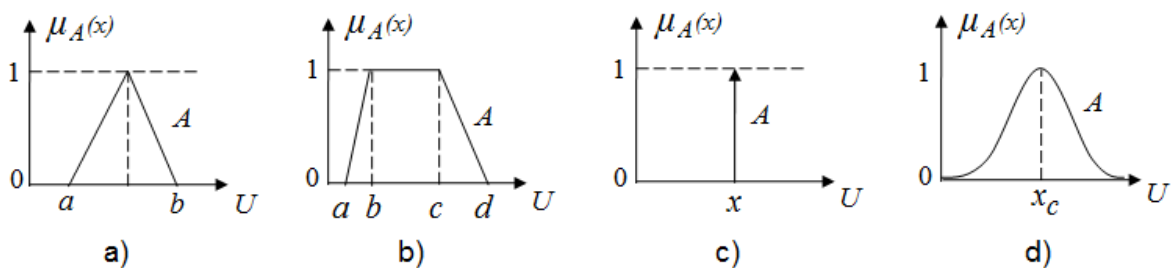


Figura 2. 5. Tipos de fuzificadores: a) Triangular, b) Trapezoidal, c) Singleton, d) Gaussiano.

Las ecuaciones para calcular el grado de pertenencia de un elemento en cada tipo de fuzificador, se describen a continuación.

Fuzificador Triangular: Donde a y b son los parámetros de la función triangular y x_c es el valor de x donde la función triangular es máxima.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ si } x^* = x_c \\ \left[1 - \frac{|x_c - x^*|}{x_c - a} \right] & , \text{ si } a < x^* < x_c \\ \left[1 - \frac{|x_c - x^*|}{b - x_c} \right] & , \text{ si } x_c < x^* < b \\ 0 & , \text{ si de otra manera} \end{cases} \quad (2.4)$$

Fuzificador Trapezoidal: Donde a , b , c y d son los parámetros de la función trapezoidal.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ si } b \leq x^* \leq c \\ \left[1 - \frac{|b - x^*|}{b - a} \right] & , \text{ si } a < x^* < b \\ \left[1 - \frac{|x_c - x^*|}{b - x_c} \right] & , \text{ si } c < x^* < d \\ 0 & , \text{ si de otra manera} \end{cases} \quad (2.5)$$

Fuzificador Singleton: Su valor de pertenencia es 1 en x^* , y 0 en cualquier otro punto.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \forall x = x^* \\ 0 & \forall x \neq x^* \end{cases} \quad (2.6)$$

Fuzificador Gaussiano: Donde x_c es el valor de x en que la función gaussiana es máxima y σ es la desviación estándar.

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x^* - x_c)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.7)$$

Para concluir esta etapa, se muestra un ejemplo de fuzificación para la variable $x = 70$. Lo que se hace es una correspondencia de la variable con cada uno de los conjuntos difusos Bajo, Medio y Alto de tipo triangulares (Figura 2.6), obteniendo con la Ecuación 2.4, que el grado de pertenencia al conjunto difuso Medio es $\mu(x) = 0.2$ y para el conjunto difuso Alto $\mu(x) = 0.4$.

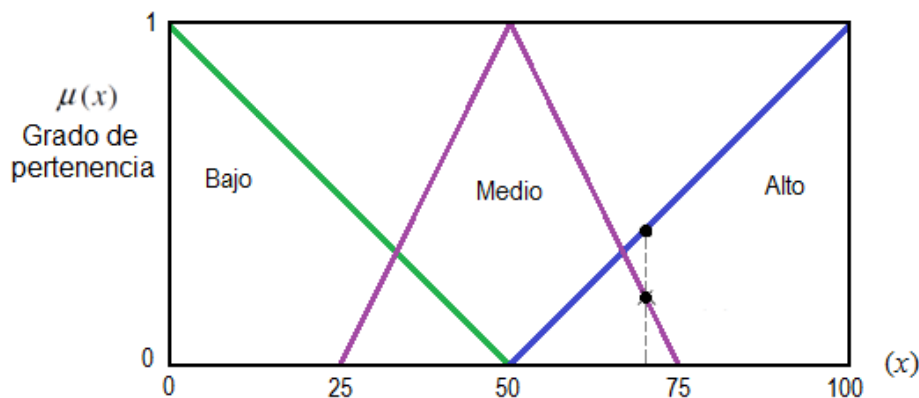


Figura 2. 6. Fuzificación de la variable x en los conjuntos difusos bajo, medio, alto.

2.1.6.2 Base de conocimiento

La base de conocimiento almacena un conjunto de reglas del tipo “SI...ENTONCES” que contienen el conocimiento obtenido mediante un proceso de experimentación realizado por un experto.

2.1.6.3 Máquina de inferencias

Auxiliado de la base de conocimiento, en la máquina de inferencias es simulado el proceso de toma de decisiones del experto. Las conclusiones generadas en esta etapa sobre la acción correctiva a tomar, están en función de las expresiones lingüísticas obtenidas en proceso de fuzificación.

2.1.6.4 Defuzificación

La defuzificación combina las conclusiones de la máquina de inferencias y las convierte en un valor numérico real para poder ser utilizado como salida del controlador. Existen tres tipos principales de defuzificadores:

- Defuzificador del criterio máximo, en el que la salida es el valor numérico real del punto donde la función de pertenencia del conjunto difuso de salida asume su valor máximo.
- Defuzificador del centro de gravedad (Ecuación 2.8), establece la variable de salida z como el centro del área cubierta por la función de pertenencia del conjunto difuso de salida A .

$$z = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \mu_A(x) x dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \mu_A(x) dx} \quad (2.8)$$

- Defuzificador del *promedio de los centros* (Ecuación 2.9), determina la variable de salida z , como el promedio de los centros de los M conjuntos difusos de salida, con sus pesos w iguales a la altura de los conjuntos difusos correspondientes.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{z}_i w_i}{\sum_{i=1}^M w_i} \quad (2.9)$$

La Tabla 2.1 hace una comparación de los tres métodos de defuzificación expuestos; la elección de uno, depende en gran medida de los requerimientos de salida para el proceso a controlar, así como los recursos disponibles para su implementación.

Tabla 2. 1. Comparación de diferentes métodos de defuzificación (LabView, PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual; National Instruments, 2009).

Parámetro de evaluación	Método de defuzificación		
	Criterio máximo	Promedio de centros	Centro de gravedad
Características lingüísticas	Resultados más plausibles.	Mejor compromiso.	Mejor compromiso.
Relación intuitiva	Buena.	Inverosímil con diferentes tipos de funciones de membresía y amplios traslapes en las funciones.	Inverosímil con diferentes formas de funciones de membresía y amplios traslapes en las funciones.
Continuidad	No.	Si.	Si.
Esfuerzo computacional	Muy bajo.	Medio.	Muy alto.
Campo de aplicación	Reconocimiento de patrones, toma de decisiones, análisis de datos.	Control de lazo cerrado, Análisis de datos, toma de decisiones.	Control de lazo cerrado, Análisis de datos, toma de decisiones.

2.1.7 Red de sensores

La mayoría de los sensores se limita a funcionar como un transductor que realiza la medición de variables del entorno y envía dicha información a un procesador central, es decir, por sí mismo el sensor carece de la capacidad de procesar y analizar los datos que detecta; sin embargo, los sensores de nueva generación son capaces de comunicarse con otros de forma inalámbrica, dando paso a las llamadas redes de sensores inalámbricas.

Una red de sensores inalámbrica (Wireless Sensor Network, WSN) consiste en un gran número de dispositivos autónomos (nodos) distribuidos de forma espacial que utilizan sensores para el monitoreo de variables físicas; estos nodos se comunican de manera inalámbrica a un dispositivo (puerto de enlace) que colecta los datos medidos y proporciona la conexión al controlador principal, donde el software realiza procesamiento, análisis y presentación de los datos. Se dice que una red de sensores es dinámica cuando dicha red es heterogénea en términos de software y hardware, es decir, cuando incluye varios tipos de nodos en una sola red. La diversidad se refiere a la monitorización de varios parámetros que luego se combinan para tomar una decisión, por ejemplo, el monitoreo de temperatura, luz, sonido y humo para la detección de incendios (Choi *et al.*, 2004; Gajbhiye y Mahajan, 2008; Chi *et al.*, 2008; Samundiswary *et al.*, 2009).

Dependiendo de la exigencia de la implementación existen varias arquitecturas y estrategias de implementación, siendo las principales la red de estrella, la red de árbol y la red de malla, la Figura 2.7 muestra la arquitectura común de una WSN



Figura 2. 7. Arquitectura común de una red de sensores inalámbrica punto-multipunto o tipo estrella.

2.1.8 Protocolos de comunicación utilizados en sistemas de iluminación

Hace 20 años, la mayoría de los fabricantes de consolas e iluminación tenían sus propios protocolos de comunicación, por lo que, era necesario usar todas las luminarias del mismo fabricante; si quería usar equipos de iluminación de distintos fabricantes (incluso simples dimmers), cada grupo requería su propia consola de iluminación.

Debido a lo anterior, surgen los protocolos de comunicación abiertos, como son DMX512, DALI, KNX y LON, haciendo posible la comunicación entre controladores y equipos de iluminación de diversos fabricantes, además de facilitar la comunicación ente el usuario y el sistema.

2.1.8.1 Protocolo de comunicación DALI

DALI es un acrónimo y estándar de “Digital Addressable Lighting Interface”, es un estándar internacional que garantiza la intercambiabilidad de balastos regulables de diferentes fabricantes. Algunas de sus ventajas son: cableado simple, posible control de unidades individuales o por grupos, control simultáneo de todas las unidades, mensajes de estado de los dispositivos de control, regulación automática y simultánea de todas las unidades cuando selecciona una escena y comportamiento de regulación logarítmica, además, debido a la estructura simple de datos no hay interferencia en la comunicación de datos (DALI AG, 2001).

DALI soporta 64 unidades con dirección individual en un mismo sistema, un máximo de 16 grupos y 16 escenas de iluminación. Utiliza un formato de datos seriales bidireccionales asíncronos (excepto en los dos bits de paro). La velocidad de transmisión para las estructuras de envío (forward) y para las de respuesta (backward) es de 1.2 kHz.

La estructura de envío se compone de 19 bits bidireccionales: 1 bit de inicio (0 -> 1: "1" lógico), 1 byte de dirección (dirección de 8-bits), 1 byte de datos (datos de 8-bits) y 2 bits de paro de alto nivel (sin cambio de dirección). La estructura de respuesta se compone de 11 bits bidireccionales: 1 bit de inicio (0 -> 1: "1" lógico), 1 byte de datos (datos de 8-bits) y 2 bits de paro de alto nivel (sin cambio de dirección), Figura 2.8.

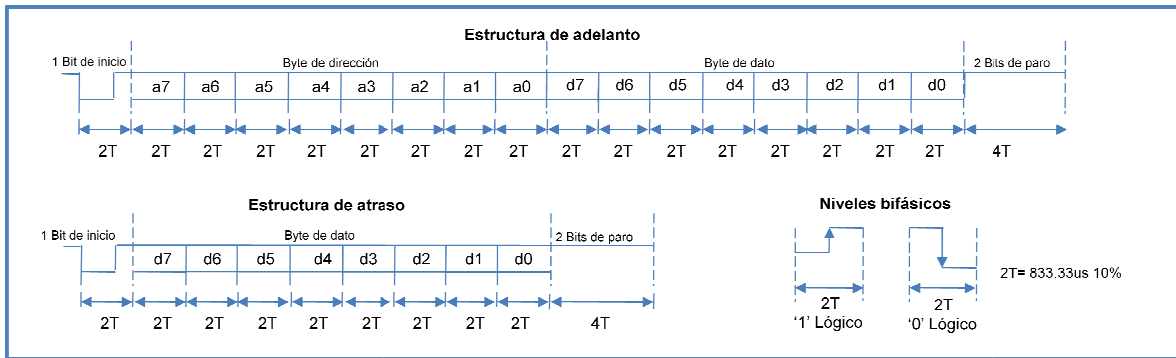


Figura 2. 8. Estructura de datos del protocolo de comunicación estándar DALI.

El tiempo mínimo de establecimiento entre dos estructuras de envío subsiguientes es 9.17 ms, mientras que entre estructuras de envío y respuesta es 2.92 ms y 9.17 ms. Si una estructura de respuesta no se ha iniciado después de 9,17 ms se interpreta como "no respuesta". En caso de violación del código, la estructura se ignora. Después de que se ha producido una violación del código, el sistema está listo de nuevo para la recepción de datos.

Cada unidad de un sistema DALI contiene los siguientes datos: dirección individual, dirección de grupo, valores de escena de iluminación, velocidad de atenuación, niveles mínimo y máximo de encendido y niveles de falla.

La selección de los cables de conexión no tiene requerimientos especiales. Cualquier cable comercial puede ser utilizado teniendo cuidado de no

exceder 2V de caída de voltaje, y de separar la interfaz digital de la fuente principal de un actuador.

2.1.8.2 Protocolo de comunicación DMX512

Es un protocolo de comunicación estándar, conocido como "E1.11, USITT DMX512–A" o solo "DMX512-A", que se utiliza principalmente para controlar la iluminación para el espectáculo a través de software o controladores de los sistemas complejos de iluminación (Yoowattana *et al.*, 2009).

El protocolo DMX512 (Digital MultipleX), se basa en la utilización de "canales" para transmitir de forma serial órdenes de control a los aparatos que lo soporten. DMX512 tiene un límite de 512 canales, y cada canal se puede regular desde 0 hasta el valor 255, valores DMX (Attard *et al.*, 2010).

La principal desventaja del protocolo DMX, es que, generalmente ofrece comunicación del tipo unidireccional, es decir, sólo transmite información desde un controlador, pero no recibe desde los aparatos (USITT DMX512–A, 2004).

2.1.8.3 Protocolo de comunicación KNX

KNX el único estándar de comunicación abierto para todas las aplicaciones de control de la vivienda y el edificio, como por ejemplo el control de la iluminación y las persianas, así como variados sistemas de seguridad, calefacción, ventilación, aire acondicionado, monitorización, alarma, control de agua, gestión de energía, contador, así como electrodomésticos del hogar, audio/video y mucho más. Esta tecnología puede ser usada tanto en viviendas y edificios de nueva construcción, como en los ya existentes.

KNX mejora el confort y la seguridad de las instalaciones y contribuye al ahorro energético. Aunado al uso de dimmers y equipos auxiliares, con éste protocolo se tiene la capacidad de conseguir hasta un 50% de ahorro en iluminación y calefacción. Soporta diferentes medios de comunicación: Par trenzado (KNX TP), Corrientes portadoras (KNX PL), Radio frecuencia (KNX RF), IP/Ethernet (IP KNX).

2.1.8.4 Protocolo de comunicación LON

LON (Local Operating Network), es un estándar para gestión técnica y el control de instalaciones en edificios inteligentes. Presenta un control distribuido y descentralizado, permitiendo distribuir la inteligencia entre sensores y actuadores. Sus módulos se comunican por bus (habitualmente par trenzado) aunque existen otros medios de comunicación (Ethernet, corrientes portadoras, radio, fibra óptica).

LON es una interfaz abierta que permite la incorporación de aparatos de diferentes fabricantes. Su instalación requiere poco cableado, es flexible y fácilmente ampliable. La dirección física única para cada componente del sistema es de 48 bits, y sólo es usada durante la configuración de la red. La Tabla 2.2 resume las características principales de los protocolos de comunicación para control de iluminación descritos con anterioridad.

2.2 Estado del arte

2.2.1 Evolución de los sistemas de iluminación

Desde hace miles de años el hombre ha necesitado la iluminación artificial para realizar diversas actividades. En la era primitiva, se utilizaban rústicas antorchas para hacer pinturas rupestres en las cuevas.

Tabla 2. 2. Características de algunos protocolos de comunicación estándares para sistemas de control de iluminación.

	DALI	DMX	KNX	LON
Protocolo	<i>Abierto</i>	<i>Abierto</i>	<i>Abierto</i>	<i>Abierto</i>
Tipo de control de la red	<i>Maestro - Esclavo</i>	<i>Maestro - Esclavo</i>	<i>Multi-maestro</i>	<i>Multimaestro</i>
Comunicación	<i>Bidireccional</i>	<i>Unidireccional</i>	<i>Bidireccional</i>	<i>Bidireccional</i>
Longitud de línea	<i>Depende del tipo de cable utilizado, permitiendo un máximo de 2V de caída de voltaje.</i>	<i>300-460m</i>	<i>Alta, depende del medio de comunicación empleado.</i>	<i>Alta, depende del medio de comunicación empleado.</i>
Número de componentes en un sistema	<i>64 unidades individuales</i>	<i>512 canales</i>	<i>Depende del medio de transmisión que se emplee.</i>	<i>Depende del medio de transmisión que se emplee.</i>

Posteriormente, las grandes civilizaciones hicieron lo mismo, utilizando antorchas con fuego para hacer sus esplendidos murales al interior de las pirámides y grandes templos; los edificios eran proyectados con grandes cubos y ventanales internos que además de iluminación eran también fuente de ventilación; el uso de velas y lámparas de aceite durante esta etapa, proporcionaron una fuente de iluminación ineficiente, poco segura y demandante en repuestos. Fue hasta la etapa del Capitalismo y la Revolución Industrial, cuando Thomas Alva Edison inventó la bombilla eléctrica, dando paso al desarrollo y perfección de las instalaciones eléctricas, con lo que, las jornadas laborales en talleres y oficinas se prolongaron hasta altas horas de la noche.

Desafortunadamente, la escasez de conocimientos sobre el proceso de la visión atrasó por cincuenta años la madurez arquitectónica del alumbrado artificial.

Los métodos científicos basados en el funcionamiento real del proceso visual, en el desarrollo de la luz artificial y en el conocimiento de la fotometría, fueron elaborados hasta después de la Segunda Guerra Mundial. Posibilitando la proyección de instalaciones de alumbrado artificial en conjunto con fuentes de luz natural (Chapa, 2004).

Actualmente, la instalación eléctrica tradicional basada en el simple cableado de interruptores, atenuadores y lámparas, se ha convertido en inadecuada para cumplir con las demandas de la tecnología de iluminación moderna, de manera que, se han desarrollado sistemas de control automático que permiten el control individual y/o grupal de los componentes de un sistema de iluminación. Por otra parte, las exigencias de un desarrollo sustentable han llevado a la humanidad a implementar medidas para aprovechar al máximo los recursos naturales y causar el menor daño posible en el medio ambiente. En cuanto a iluminación se refiere, la mejor estrategia para optimizar la eficiencia energética es el aprovechamiento de la luz natural (Mansy, 2004).

Hoy en día, el principal objetivo de los sistemas de control de la iluminación artificial es el ahorro de energía, y para ello se han desarrollado diferentes formas de control. Entre las principales destacan las siguientes:

- Diseño de la instalación eléctrica de lámparas de acuerdo al lugar y la actividad desarrollada. Este tipo de sistemas no incluyen ningún tipo de control automático. Se basa en el uso de técnicas y conocimientos de luminotecnia para calcular el nivel de iluminación que ofrezca confort visual a los usuarios de acuerdo a la actividad desarrollada en

el espacio de trabajo. Aunque cumple con el objetivo de asegurar el confort visual, no optimiza el uso de la energía eléctrica.

- Uso de sensores de presencia. Ofrece el encendido automático del sistema de iluminación sólo cuando el área de trabajo está ocupada, logrando reducir en forma significativa el uso de la energía eléctrica.
- Control por horarios. Con base en un estudio previo del horario de actividades del lugar y el comportamiento de la iluminación en su interior, este tipo de control permite programar horarios de funcionamiento de las luminarias.
- Uso de sensores de iluminación. La instalación de sensores permite el conocimiento del nivel de iluminación presente en el área de trabajo, con lo que es posible usar solamente la iluminación eléctrica necesaria para alcanzar el confort visual del usuario. Además, ofrece ahorro de energía toda vez que sea superado el nivel de confort visual, al no hacer uso de la iluminación artificial.

2.2.2 Sistemas basados en detección de ocupantes

Leephakpreeda en 2004, desarrolla un método de control basado en la adaptación de la ocupación del espacio de trabajo, determinando el tiempo de apagado automático de la iluminación después de que el espacio ocupado es abandonado. El método está basado en el análisis del comportamiento en periodos pasados de los ocupantes y con base en ello predice el comportamiento de los parámetros de distribución de frecuencia de los periodos de inactividad; sin embargo, el sistema responde eficientemente siempre y cuando el comportamiento de los ocupantes no presente cambios abruptos.

2.2.3 Sistemas de control clásico

Los sistemas de control clásico, basados en una regulación continua, presentan dificultades para ajustar su funcionamiento a los cambios rápidos de la iluminación natural, tomando en cuenta esto, el control difuso puede ser la mejor solución en implementar la iluminación natural, un problema que no puede ser fácilmente representado mediante modelos matemáticos debido a sus datos complejos (Kolokotsa, 2003; Cziker *et al.*, 2008).

2.2.4 Sistemas basados en lógica difusa

Se considera que el concepto de lógica difusa apareció en 1965, en la Universidad de California en Berkeley, introducido por Lotfi A. Zadeh (Noriega, 2010). Wang *et al.* (2009) en su investigación simulan un sistema de control difuso y concluyen que éste mejora la dinámica de un sistema de iluminación, al permitir un buen funcionamiento del sistema, estabilizar el voltaje sin afectar la calidad de la iluminación y ahorrar energía eléctrica, lo que lo hace factible para su implementación.

En diversas investigaciones, se ha visto que, técnicas de control basadas en lógica difusa han presentado buenos resultados al controlar el ambiente interior de los edificios (Trobec *et al.*, 2006; Pan *et al.*, 2008; Luna-Rubio *et al.*, 2009; Yang y Nam, 2010). En este tipo de estrategias de control las reglas difusas de iluminación interior son diseñadas para dar prioridad a la iluminación natural, de manera que la iluminación artificial (eléctrica) es encendida al 100% cuando la entrada de iluminación natural es cero, y es atenuada conforme la entrada de iluminación natural aumenta. Estudios realizados han demostrado que cuando se implementa un sistema de control difuso de iluminación se logran ahorros de energía que van desde 30% a 50% (Luna-Rubio *et al.*, 2009; Yang y Nam, 2010).

Cziker *et al.* en 2007 presenta la estructura de un controlador difuso, sus reglas de operación y la descripción de la influencia sobre los valores impuestos de los niveles de iluminación, como técnica para aprovechar la iluminación natural. Su sistema de control de iluminación tiene tres componentes principales: un controlador de energía, un circuito lógico y un dispositivo sensor. El sistema de control usa un controlador difuso como circuito lógico de control de iluminación y continuamente controla balastos electrónicos regulables mediante señales analógicas de bajo voltaje que se usan como controladores de energía. El balastro recibe una señal del dispositivo de control y consecuentemente cambia el flujo de corriente a través de la lámpara, como sensores se utilizan un dispositivo fotosensible y sensores de movimiento. Las variables de entrada del controlador difuso son los niveles de luminiscencia medidos por los foto-sensores, mientras las variables de salida son los niveles que la señal de control de CD envía al balastro. Cada variable ya sea de entrada o salida, tiene diferentes valores difusos definidos por la inteligencia del sistema de control implementado. Los datos obtenidos por la simulación demostraron exactitud de la solución propuesta.

2.2.5 Redes de sensores en los sistemas de iluminación

En los últimos años el desarrollo de redes inalámbricas de sensores (WSN's) para vigilancia y control de edificios ha recibido una creciente atención, ya que han demostrado ser mas flexibles, requerir menos mantenimiento e incluso ser más rentables que la actual tecnología BMS, sistemas de administración de edificios (Wen and Agogino, 2011; Painter *et al.*, 2012). Estas ventajas y el ahorro de energía que se obtiene con su implementación han ampliado la aplicación de las WSN's en entornos industriales, de seguridad y sobretodo domótica (Lun-Wu *et al.*, 2010; Wen-Tsai and Yao-Chi, 2011). Sin embargo existe una serie de problemas cruciales que en términos cualitativos determinan la confiabilidad en la comunicación de una WSN, como son el riesgo de pérdida de datos debido a interferencias, la exactitud de las lecturas y la reunión eficaz de datos en el punto

de ruión de la información. Una de las principales causas de degradación de la confiabilidad es la atenuación de la señal a través de la estructura de un edificio, de manera que dependiendo del tipo de material de la estructura y la topología de red se tendrá mayor o menor confiabilidad (Jang and Healy, 2009). Los actuales avances tecnológicos en electrónica y comunicaciones han permitido la integración de actuadores a una WSN, dando como resultado redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN's). En una WSAN los sensores recolectan la información de la variable física de interés, mientras los actuadores llevan a cabo la acción generada por un algoritmo de control a partir de la información entregada por los sensores (Nakamura *et al.*, 2008; Cao *et al.*, 2009).

Las redes de sensores han sido de mucha utilidad en lo que a control de iluminación se refiere, ya que, permite monitorear los datos ambientales en diferentes puntos del edificio, obteniendo así una caracterización del sistema más cercana a la real. El uso de una red de sensores en sistemas de control de iluminación ha dado buenos resultados, al tomar los datos leídos del ambiente como variables de entrada del controlador difuso.

Wang y Wang en 2010, desarrollan un sistema de control de iluminación inteligente usando una red de sensores y técnicas de control difuso para controlar la apertura y cierre de las persianas de una residencia. La comunicación del sistema se efectúa mediante el protocolo de comunicación inalámbrico ZigBee, permitiendo el envío de datos de los sensores a una computadora, en la que son tomados como variables de entrada del controlador difuso, la salida del controlador es enviada a los controladores de las persianas y a los de iluminación artificial.

El control de iluminación hace uso (en tanto le sea posible) de la iluminación natural como fuente de iluminación, y de la iluminación artificial como complemento. El diagrama de flujo del controlador es mostrado en la Figura 2.9.

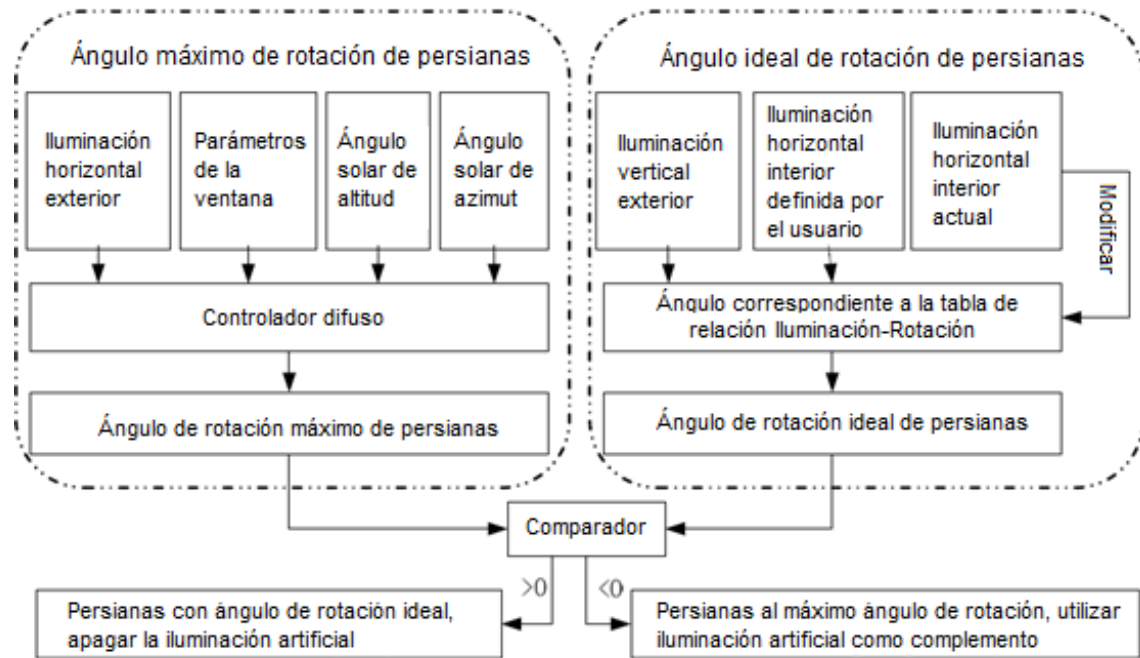


Figura 2. 9. Flujo del controlador de iluminación implementado por Wang y Wang, 2009.

2.2.6 Sistemas de administración de energía

En la última década se han desarrollado un gran número de sofisticados sistemas de administración de edificios (BMS's) para el control de iluminación, HVAC, seguridad y otros servicios, que contribuyen significativamente en el confort de los usuarios y en la reducción del consumo de energía. En lo que a iluminación se refiere protocolos de comunicación como DALI, KNX y DMX512 han tenido mucho auge debido a su estandarización y flexibilidad para controlar las luminarias de manera individual o por grupos, permitiendo establecer diferentes niveles de iluminación de acuerdo a la tarea o a las preferencias visuales de los usuarios. No obstante, la implementación de estos sistemas suele ser rentable sólo en nuevos edificios, debido a los extensos requerimientos de cableado necesarios para la comunicación entre sus dispositivos. (Zhong et al., 2009; Attard et al., 2010; Bujdei and Moraru, 2011).

2.2.6.1 Uso de protocolos de comunicación

Hurtado en 2009, presenta la implementación de un sistema de iluminación basado en el protocolo de comunicación serial bus CAN. El sistema incluye el balastro para operar una lámpara fluorescente lineal y un programa para controlar las diferentes funciones establecidas al sistema desde una computadora personal. Dentro de las funciones con las que cuenta este sistema propuesto están la posibilidad de realizar un control de la intensidad luminosa en un rango amplio, además de apagar o encender la lámpara en cada balastro conectado al sistema o en un grupo de ellos. El sistema ofrece la posibilidad de agregar una gran cantidad de balastos, así como el aviso oportuno en el caso de presentarse un fallo en la lámpara de algún balastro.

DALI (Digital Addressable Lighting Interface), permite realizar un sofisticado control de iluminación mientras incrementa la flexibilidad y reduce los costos de instalación. Opera en modo maestro-esclavo, un controlador maestro puede controlar hasta 64 unidades DALI esclavas (Wu *et al.*, 2006). Aunque únicamente soporta dispositivos que operan bajo este mismo protocolo de comunicación, es posible expandir su red de iluminación en una red de sensores de propósito general (Ma y Wobschall, 2007) proporcionando la economía de usar un único bus para la iluminación en edificios.

La mayor parte de los sistemas de control de iluminación DALI funcionan de la siguiente manera: el usuario opera el sistema a través del controlador maestro, el cual envía mensajes a todos los mecanismos de control electrónico esclavos conteniendo una dirección y un comando. La dirección determina si el esclavo obedece. A fin de mejorar la factibilidad del sistema DALI, se han tomado en cuenta algunos problemas como la configuración de dirección, mecanismos de retroalimentación y red de sensores.

Zhang *et al.* en 2006 presenta el diseño de un módulo maestro-esclavo mediante el uso de DALI. El diseño del sistema está dividido en la unidad maestra y la unidad esclava. La unidad esclava puede establecer la luminosidad de una lámpara conectada, mientras que el nivel deseado es establecido por la unidad maestra. El software del módulo maestro es reprogramable mediante el uso de una interfaz y es el que maneja el protocolo DALI. Está basado en un módulo principal que consiste en la inicialización de variables globales, llamadas para inicializar rutinas en otros módulos, y un lazo eterno. En el lazo eterno diferentes banderas son revisadas para ver si una acción ha sido tomada.

Li *et al.* (2008) y Zhong *et al.* (2009) evaluaron el sistema entero como un mecanismo de retroalimentación de tres estados (tres objetos individuales), de forma general, su funcionamiento es el que sigue: un sensor envía el mensaje adquirido al controlador, a continuación este envía la instrucción de control a el objeto destino, el cual conforme a la información de dirección determina si responde cambiando su estado (regulación de la luminosidad de la lámpara conectada). Como mensaje de retroalimentación el estado del objeto destino es enviado a la unidad de control, además de ser adquirido mediante la implementación, para entonces ser enviado a la unidad de control. Además Li *et al.* (2008) a fin de mejorar la factibilidad del sistema DALI, toman en cuenta algunos problemas como la configuración de dirección, mecanismos de retroalimentación y red de sensores. La forma de configurar la dirección es innovada, al establecer directamente la dirección a través de hardware (interruptores DIP en la unidad esclava).

Con la red universal multisensores, el sistema DALI ofrece beneficios tales como un constante control de iluminación y operación remota. Sin embargo la implementación de este sistema resulta económicamente poco accesible debido a los componentes que utiliza. El uso de sensores de propósito general aunado a

la técnica de control difuso optimiza la factibilidad de implementar el sistema DALI en edificios inteligentes para el control de iluminación.

Ma y Wobschall en 2007, analizan la manera de expandir una red de iluminación estándar DALI, en una red de sensores de propósito general. La propuesta de un nuevo diseño de controlador DALI soporta dispositivos DALI estándar y sensores ambientales sobre el mismo bus, de manera que proporciona la economía de usar un único bus para la iluminación en edificios. Para extender el bus DALI existente y comunicar la interfaz hardware con los sensores de propósito general, se tomaron en cuenta tres problemas:

Primero, la comunicación entre sensores y controlador no debe interferir con los dispositivos estándar DALI. Para hacer compatible la comunicación del sensor con el protocolo DALI se cambió la codificación de la cadena de bits usando una velocidad de baudios más rápida y un formato de datos diferentes. Si el ancho de pulso del dato del protocolo del sensor es menor que el ancho de pulso del dato DALI estándar, entonces la comunicación del dispositivo DALI no será perturbada, ya que ignorará los pulsos del sensor. Un mensaje estándar DALI tiene más alta prioridad en el bus que un mensaje del sensor. Segundo, utilizando el mismo hardware, el protocolo de comunicación del sensor debe proporcionar más funciones que el protocolo de iluminación estándar DALI. Tercero, los comandos DALI estándar, deben ser compatibles con los más de 1451 formatos de transductor digital universales.

2.2.7 Métodos de control

Con base en las investigaciones anteriores, es claro ver que dependiendo de la aplicación, existen diversas formas de controlar la iluminación en un espacio, las cuales van desde simples atenuadores independientes (lo cual resulta

complicado y poco práctico en instalaciones extensas) hasta los más sofisticados (y por supuesto caros) sistemas de control de iluminación programables.

La técnica de control difuso resulta una herramienta adecuada para el control de iluminación y para aprovechar la iluminación natural proveniente de las fuentes de iluminación externas, dado que las reglas de control dependen únicamente de las condiciones ambientales del lugar de instalación. Al aplicar la técnica de control difuso al control de balastos electrónicos regulables, se obtiene un sistema factible y adecuado, que aunado a la implementación de una interfaz de usuario hace del sistema una herramienta de fácil operación.

Por su parte, el uso del protocolo de comunicación DALI ofrece beneficios tales como un constante control de iluminación y operación remota. Sin embargo la implementación de este sistema resulta económicamente poco accesible debido a los componentes que utiliza. No obstante es posible expandir esta red con el uso de sensores de propósito general.

III. METODOLOGÍA

En este capítulo se relata el proceso necesario para desarrollar el sistema de control de iluminación propuesto. Se darán a conocer las características del material empleado, así como el diseño, la validación e implementación de los componentes fundamentales del sistema de control: la red de sensores, el controlador difuso, el protocolo de comunicación y la interfaz gráfica de usuario. Al final del capítulo se presentan los resultados previos obtenidos.

3.1 Panorama general del proyecto

Para alcanzar el objetivo de esta investigación, se propone un Sistema Inteligente de Control de Iluminación (SICI), que funciona sobre la base de una red inalámbrica tipo estrella, es decir, un coordinador conectado a varios nodos. Bajo esta topología, es posible diseñar un sistema con tres módulos básicos: maestro, esclavos y la planta (Figura 3.1).

El módulo maestro contiene la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, Apéndice A.3), donde se ofrece la posibilidad de interactuar con el SICI, ya sea, para modificar parámetros de funcionamiento (*e.g.* nivel de iluminación), o bien, para consultar variables. Este módulo, funciona a la vez como coordinador, por lo que es el responsable de establecer el canal de comunicaciones y el identificador de toda la red, una vez establecidos estos parámetros, el coordinador puede comunicarse con los esclavos y ser origen y/o destinatario de información.

El módulo esclavo está formado en hardware por un módulo de comunicación inalámbrica que permite su conexión a la red, un sensor de iluminación para monitorear en tiempo real la luz existente en el área de trabajo, y, como parte medular, un microcontrolador. Además, se tiene un relevador para

controlar el encendido/apagado de la lámpara y la electrónica analógica encargada de adaptar tanto la señal de entrada del sensor, como la señal de control que se aplica al balastro.

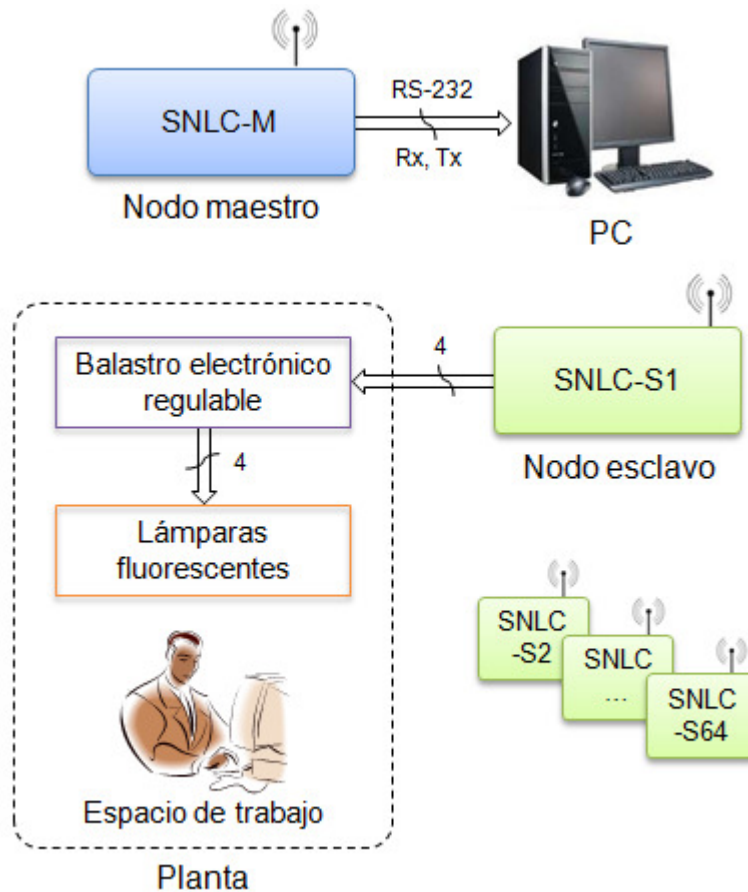


Figura 3. 1. Componentes básicos del SICl: módulo maestro, módulos esclavos y planta (balastro y lámparas fluorescentes).

Por la parte de software, el microcontrolador contiene el algoritmo para interpretación del protocolo de comunicación del sistema, las matemáticas para convertir la señal eléctrica del sensor a su correspondiente valor en luxes, y el algoritmo de control difuso encargado de mantener el nivel de iluminación deseado (Apéndice A.1).

De manera general, las tareas del módulo esclavo son las siguientes: interpretar el protocolo de comunicación del sistema y ejecutar la acción indicada (modificación de parámetros o envío de información), adquirir la señal del sensor mediante uno de los convertidores A/D del microcontrolador, y enviar el valor censado al algoritmo de control difuso, a fin de generar, en una de sus salidas PWM, la señal de control que debe ser aplicada al balastro para regular el flujo luminoso de las lámparas. Cabe mencionar, que, un módulo esclavo interactúa únicamente con el coordinador, en otras palabras no existe comunicación entre esclavos.

El SICl propuesto se puede manipular desde dos interfaces diferentes: la convencional y a través de una GUI; la primera refiere al uso de los interruptores físicos para encender o apagar el sistema; la segunda, involucra el uso de software para operar el sistema (Figura 3.2).

Dentro de la GUI se ofrecen dos métodos de control, a través de los cuales es posible manipular y consultar variables del sistema de forma grupal o individual:

- *Convencional*: hace analogía al uso de interruptores y atenuadores de iluminación (dimmers), al ofrecer la opción de encender/apagar el sistema y regular el flujo luminoso de las lámparas con escenas de iluminación previamente establecidas.
- *Automático*: Activa el controlador difuso para alcanzar el nivel de iluminación deseado en el área de trabajo. En este modo de operación, el usuario puede modificar parámetros de funcionamiento del controlador.

El SICI ofrece la ventaja de que dependiendo de la actividad a realizar el usuario establece el nivel de iluminación deseado en el área de trabajo, éste valor, junto con la lectura de los sensores, sirven como entradas del controlador difuso, donde, básicamente, se comparan las variables de entrada con la base de conocimiento para establecer una salida (VCD: aumenta, no cambia o disminuye); la salida es aplicada como señal de control analógica a los balastos, y así, regular el flujo luminoso de las lámparas.

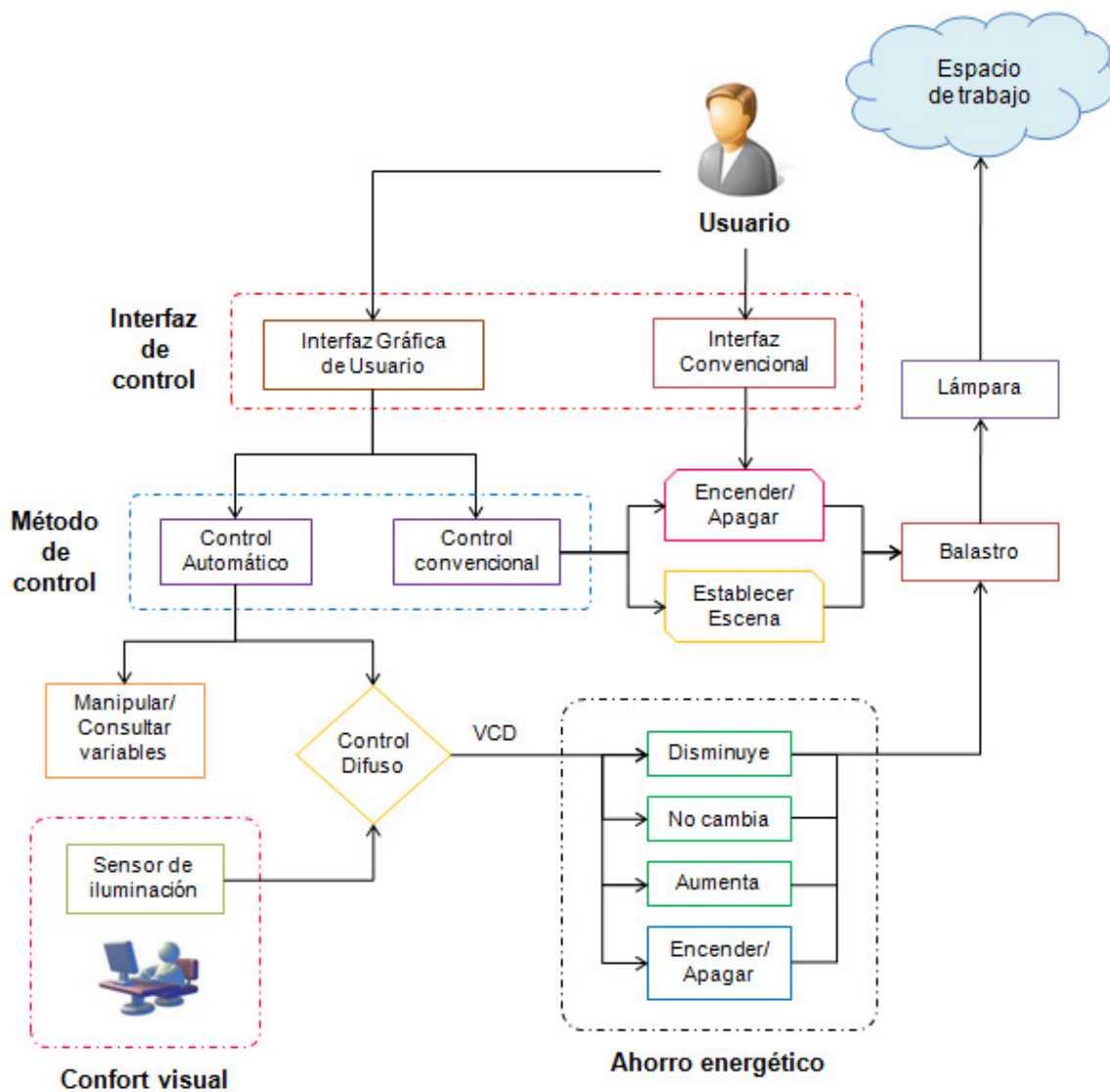


Figura 3. 2. Elementos principales y esquema de funcionamiento general del SICI.

3.2 Recursos y materiales empleados

Durante el desarrollo del proyecto se utilizaron diversos programas y componentes. Como MatLab 2009 para inicialmente programar y simular el algoritmo del controlador difuso con un enfoque de programación en lenguaje C a fin de migrar el código fácilmente a la plataforma CCS. XCTU para la configuración de los módulos inalámbricos Xbee. Labview, durante la validación del controlador. NetBeans Java para el diseño y desarrollo de la GUI; y CCS Compiler para la programación de los microcontroladores.

Los componentes principales del SICI se describen a continuación, mientras que, otros dispositivos utilizados en el desarrollo de esta tesis se describen más adelante.

3.2.1 Lámparas

Las lámparas instaladas en el CEDIT son lámparas fluorescentes que corresponden al modelo F032/850/ECO de OSRAM, de 32W de potencia nominal, que por su tipo de bulbo corresponden a la línea T8, entre sus principales características destacan: rápido encendido, capacidad mínima de lúmenes igual a 2900 lm, vida útil de 24000 horas, eficacia mínima de 90.6 lm/W, temperatura de color de 5000 °K \pm 10% e Índice de Rendimiento de Color mínimo de 80.

3.2.2 Balastos

Los balastos utilizados son del tipo electrónicos regulables del fabricante Havells SLI, modelo 8137 2x32 W (Figura 3.3). Entre sus características destacan: rápido encendido, tensión de trabajo de 127 \pm 10% a 50/60 Hz, control regulable de 1–10 VCD, nivel de regulación de 5% a 100% de la intensidad luminosa, factor de potencia >0.99 y operación libre de parpadeos.

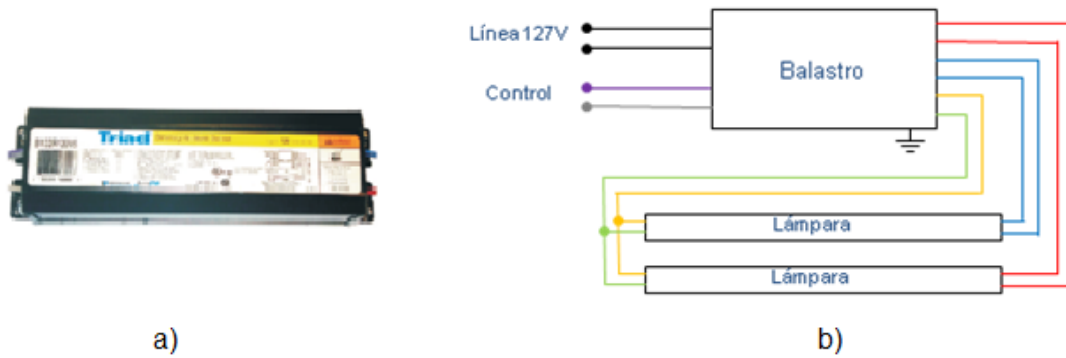


Figura 3. 3. a) Balastro electrónico regulable SLI 8137, b) Diagrama de conexiones para dos lámparas.

En la prueba de desempeño del balastro y las lámparas (Figura 3.4), se observa como a medida que la señal de control analógica aplicada al balastro aumenta, también lo hacen el consumo de corriente y la salida de flujo luminoso del sistema; éste comportamiento, favorece el ahorro de energía toda vez que el nivel de iluminación se alcance sin aplicar la señal de control máxima.

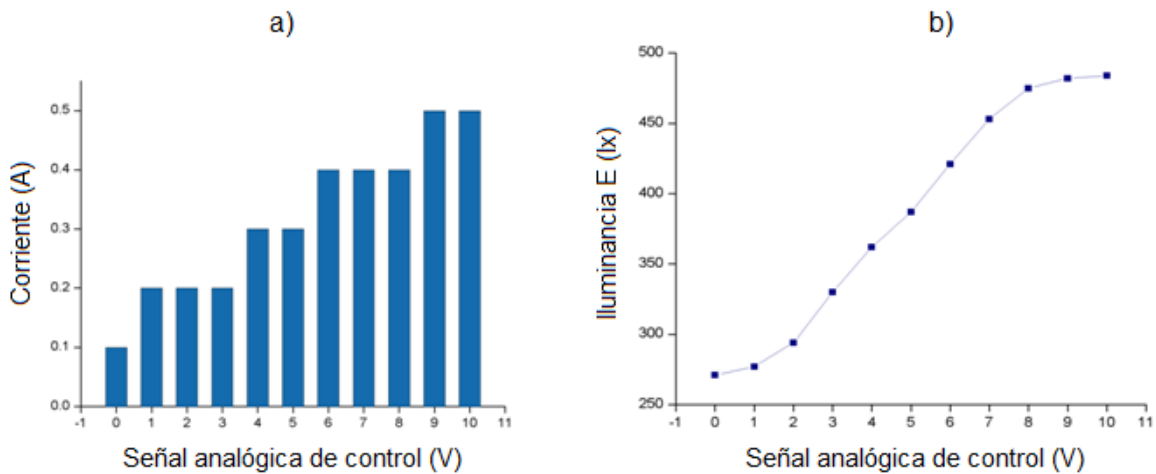


Figura 3. 4. Desempeño del balastro al incrementar la señal de control: a) Consumo de corriente del balastro, b) Nivel de iluminación en el área de trabajo debido a la variación de flujo luminoso de la lámpara.

3.2.3 Sensor de iluminación

Para monitorear el nivel de iluminancia en el interior del edificio, se utiliza como elemento sensor, el foto-detector de luz ambiente SFH-5711 fabricado por OSRAM. La razón para elegir éste sensor es principalmente que, a diferencia de un foto-sensor estándar de silicio, el SFH 5711 ofrece una casi perfecta relación con la curva de sensibilidad espectral del ojo humano λ (Figura 3.5).

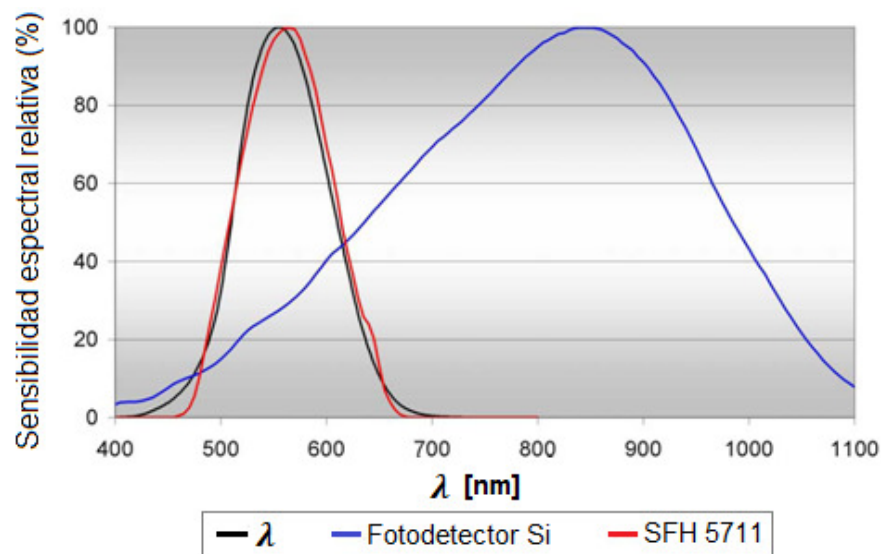


Figura 3. 5. Sensibilidad espectral relativa de un foto-sensor estándar de silicio (Si) y el SFH 5711 de OSRAM comparado con la sensibilidad del ojo humano. (OSRAM, 2006).

El SFH 5711 entrega a su salida una corriente logarítmica (Figura 3.6) expresada por la siguiente ecuación:

$$I_{out} = S * \log (E_v/E_o) \tag{3.1}$$

Donde:

E_v es la iluminancia media

$E_o = 1 \text{ lx}$

$S = 10\mu\text{A}/\text{dec}$

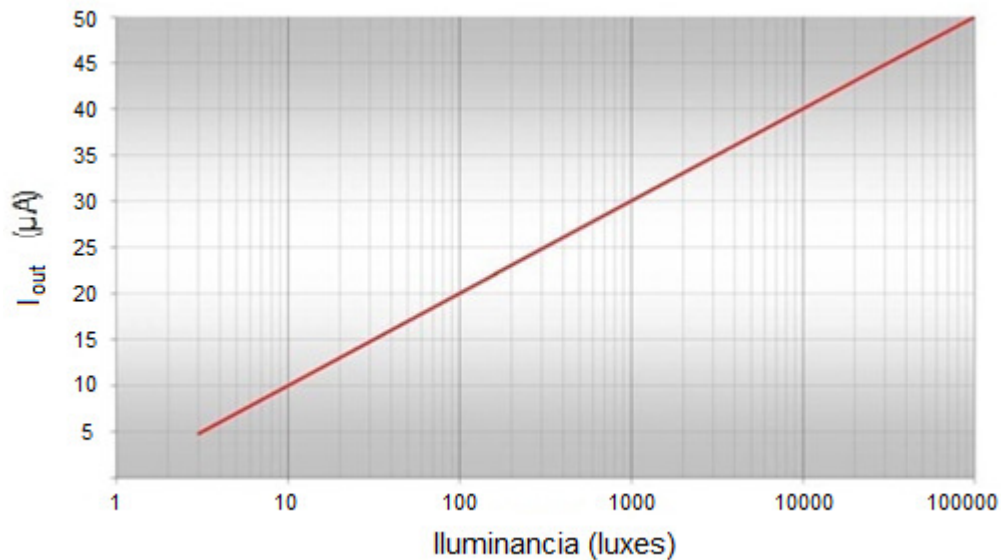


Figura 3. 6. Corriente de salida $I_{out}[\mu A]$ del SFH 5711 contra la iluminancia $E_v[lux]$. (OSRAM, 2006).

Dada la naturaleza de la salida del sensor, típicamente es utilizada una resistencia de carga R_L , por donde se hace pasar la corriente eléctrica equivalente a la intensidad lumínica medida (Figura 3.7). Dependiendo de la aplicación y el rango de medición deseado, el valor de la resistencia puede variarse.

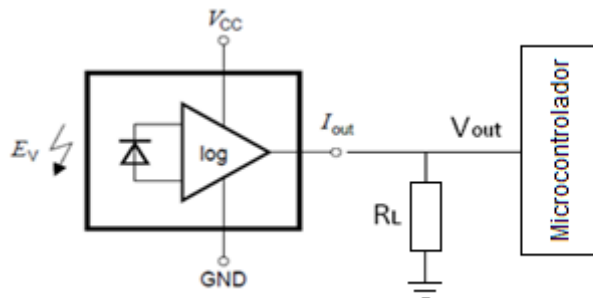


Figura 3. 7. Conexión típica del SFH5711, para detectar la iluminación ambiental a partir de su salida logarítmica (Osram, 2006).

Para el propósito del proyecto se emplea la configuración mostrada en la Figura 3.7, auxiliada de un filtro pasa-bajas de primer orden analógico (Ecuación

3.2) que elimina el ruido eléctrico y magnético presente en el circuito y el ambiente (Figura 3.8).

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (3.2)$$

Donde:

R es el valor de la resistencia.

C es el valor del capacitor.

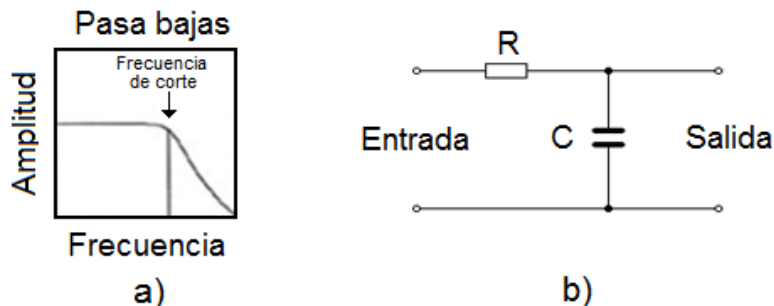


Figura 3. 8. Filtro pasa bajas: a) Respuesta en frecuencia, b) Circuito de primer orden pasivo.

3.2.4 Microcontrolador

El microcontrolador utilizado es el PIC18F4550 de Microchip el cual tiene una memoria RAM de 32.7 Mb y trabaja a 48 MHz, cuenta con dos módulos PWM, cuatro temporizadores, trece canales de entradas analógicas, treinta puertos de entradas/salidas y un puerto de comunicación USB. Aunque este componente es sobrado en entradas/salidas y su módulo USB no es utilizado, se seleccionó debido a su gran capacidad de memoria, su disponibilidad y bajo costo.

3.2.5 Módulo de comunicación inalámbrica

Los módulos de comunicación inalámbrica empleados en la red, son módulos Xbee del fabricante MaxStream. Los cuales funcionan bajo el protocolo

de comunicación estándar Zigbee. Su uso se justifica debido a la utilidad que éstos tienen en redes de sensores para entornos industriales, médicos y, sobre todo, domóticos; además de su bajo costo, bajo consumo de potencia, uso de bandas de radio libres y sin necesidad de licencias, redes flexibles y extensibles, y su instalación barata y simple, evitando instalar un bus físico exclusivo para transmisión de datos, que es la forma en que operan los protocolos para control de iluminación existentes en el mercado.

Los módulos utilizados corresponden al modelo Xbee-S1, cuya distancia de alcance es de 100m en línea vista y de 30m en interiores. Velocidad de transmisión de 250 kbps lo que hace posible una comunicación continua y sostenida en el rango de alcance. El consumo de potencia de estos módulos es de 1mW durante la transmisión de datos. Las comunicaciones Zigbee se realizan en la banda libre de 2.4GHz, y a diferencia de otros protocolos de comunicación inalámbrica, éste realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia (un canal de entre 16 posibles). Por último, debido al ancho de su dirección, teóricamente una red Zigbee puede ser formada por 65535 equipos, no obstante, el SICl ha sido limitado a 65 equipos (un coordinador y 64 esclavos).

El modo más común de operación de los módulos Xbee es mediante el uso de comandos AT. Los cuales son instrucciones codificadas que conforman un lenguaje de comunicación entre el usuario y un módem. Técnicamente la implementación de los comandos AT se lleva a cabo desde la plataforma seleccionada como interfaz de usuario, y no depende del canal de comunicación a través del cual éstos comandos sean enviados (cable serial, canales infrarojo, zigbee, bluetooth, etc).

El modo de comandos en Zigbee, permite ingresar comandos AT al módulo Xbee para configurar, ajustar o modificar sus parámetros (configurar modo

de operación, ajustar la dirección de destino y modificar una salida digital de nivel alto o bajo). Algunos de los comandos AT se listan en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Comandos AT utilizados en el diseño de la red de sensores para monitoreo de variables.

Comando AT	Nombre y descripción	Rango de valor
DH	Dirección de destino alta. Establece/Obtiene los 32 bits más significativos de los 64 bits de dirección.	0-0xFFFFFFFF
DL	Dirección de destino baja. Establece/obtiene los 32 bits menos significativos de los 64 bits de dirección.	0-0xFFFFFFFF
MY	16 bits de dirección de red. Establece/obtiene los 16 bits de dirección de red del módulo RF.	0-0xFFFE
CH	Canal de operación. Establece/obtiene el número de canal de operación utilizado para transmitir y recibir datos entre los módulos RF.	0x0B-0x1A
ID	PAN ID. Establece/obtiene el PAN (identificador de red de área personal) ID.	0-0xFFFF
CE	Coordinador habilitado. Establece/obtiene el funcionamiento del módulo RF.	0 - dispositivo final. 1 - coordinador.
AP	Habilitación modo API. Habilita el módulo para operar usando una trama de datos API en lugar de usar la UART.	0 - deshabilitada. 1 - API habilitada. 2 – API habilitada con caracteres de escape.
IS	Muestreo forzado. Fuerza la lectura de todas las salidas digitales y analógicas habilitadas.	--
D1 ... D7	Configuración AD1/DIO1. Selecciona o lee el funcionamiento de la salida AD1/DIO1.	0 - deshabilitada. 2 - entrada analógica. 3 - entrada digital. 4 - salida digital baja. 5 - salida digital alta.

3.2.6 Instrumento patrón

Para autenticar las lecturas de niveles de iluminación obtenida del sensor SFH5711, se utiliza como instrumento patrón el luxómetro portátil HI97500 de HANNA Instruments. El HI 97500 es un luxómetro portátil diseñado para realizar las medidas de luminosidad en manera simple. Está dotado de un fotodiodo que

es sensible al mismo espectro de luz del ojo humano. El rango de medición del HI97500 va de 0.001 klux a 199.9 klux con una precisión de $\pm 6\%$ de la lectura.

3.3 Descripción del área de estudio

La presente investigación se desarrolla en el Centro de Diseño e Innovación Tecnológica (CEDIT), ubicado en la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), cuya ubicación geográfica propicia un clima semiárido y semiseco, soleado la mayor parte del año. El sistema de control de iluminación se implementará en el lado izquierdo de la planta alta del CEDIT (área de cubículos B), el cual cuenta con un sistema de iluminación que consta de 2 apagadores, 48 lámparas fluorescentes y 24 balastos electrónicos, además el área cuenta con ventanas que permiten la entrada de la iluminación natural (Figura 3.9).

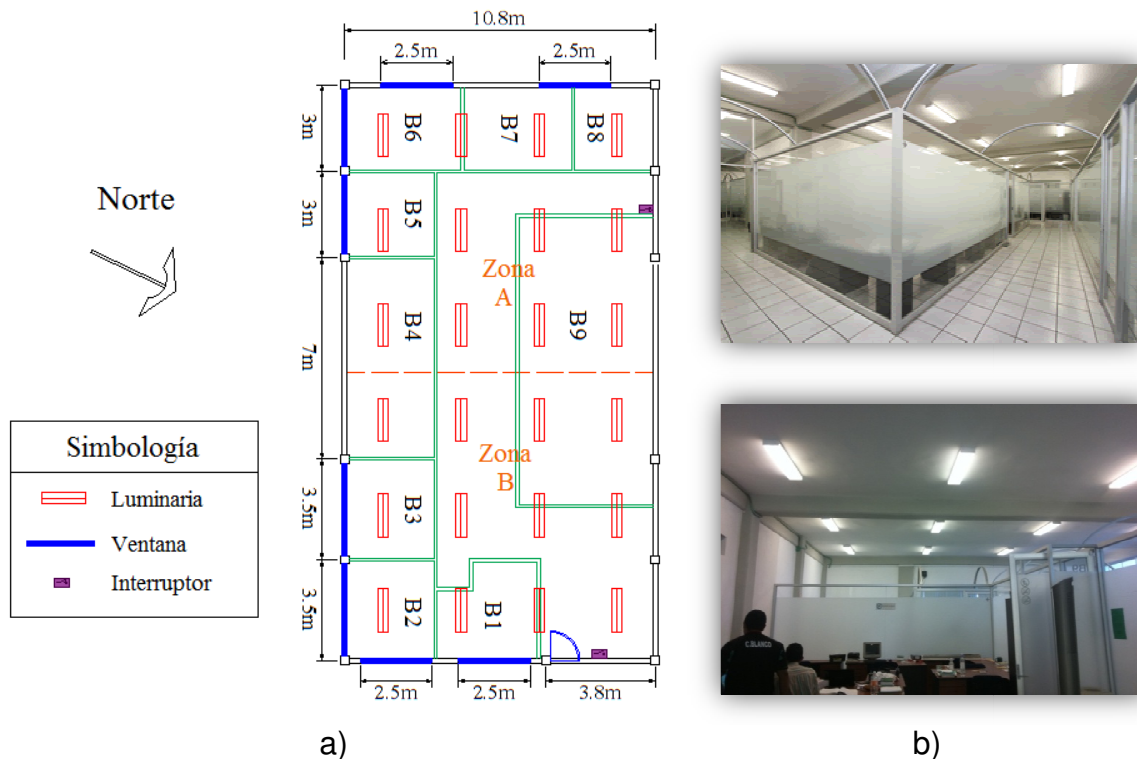


Figura 3. 9. a) Vista superior del lado izquierdo de la planta alta del CEDIT, b) Vista interior del área de trabajo.

El sistema de iluminación del área de trabajo está dividido en dos secciones A y B (Figura 3.9a), cada una formada por 12 luminarias que contienen dos lámparas fluorescentes, controladas por un balastro electrónico no regulable de 2x32 Watts. El encendido/apagado de las secciones se efectúa mediante un interruptor sencillo, lo que trae como consecuencia que, aunque las zonas próximas a las ventanas, tengan un nivel de iluminación adecuado debido a la luz del día, las luminarias lejanas a esta zona deben ser encendidas a causa de la ausencia de la misma, provocando el funcionamiento total del sistema, y con ello, un consumo excesivo de energía eléctrica.

Como referencia para establecer el nivel de iluminación en el área de trabajo se hace uso de las recomendaciones indicadas para establecimientos educativos en la Norma Europea UNE-EN 12464-1 (Tabla 3.2).

Tabla 3. 2. Niveles de iluminación para edificios educativos. Fuente: Norma UNE-EN 12464-1.

6.2 Edificios educativos					
N° ref	Tipo de interior, área y actividad	\bar{E}_m	UGR_L	R_a	Observaciones
		lux			
6.2.1	Aulas, aulas de tutoría	300	19	80	La iluminación debe ser controlable
6.2.2	Aulas para clases nocturnas y educación de adultos	500	19	80	La iluminación debe ser controlable
6.2.3	Sala de lectura	500	19	80	La iluminación debe ser controlable
6.2.4	Pizarra	500	19	80	Evitar reflexiones espectaculares
6.2.5	Mesa de demostraciones	500	19	80	En salas de lectura 750 lux
6.2.6	Aulas de arte	500	19	80	
6.2.7	Aulas de arte en escuelas de arte	750	19	90	$T_{cp} \geq 5\ 000\ K$
6.2.8	Aulas de dibujo técnico	750	16	80	
6.2.9	Aulas de prácticas y laboratorios	500	19	80	
6.2.10	Aulas de manualidades	500	1	80	
6.2.11	Talleres de enseñanza	500	19	80	

6.2.12	Aulas de prácticas de música	300	19	80	
6.2.13	Aulas de prácticas de informática	300	19	80	Trabajo con EPV: véase el apartado 4.11
6.2.14	Laboratorio de lenguas	300	19	80	
6.2.15	Aulas de preparación y talleres	500	22	80	
6.2.16	Halls de entrada	200	22	80	
6.2.17	Áreas de circulación, pasillos	100	25	80	
6.2.18	Escaleras	150	25	80	
6.2.19	Aulas comunes de estudio y aulas de reunión	200	22	80	
6.2.20	Salas de profesores	300	19	80	
6.2.21	Bibliotecas: estanterías	200	19	80	
6.2.22	Bibliotecas: salas de lectura	500	19	80	
6.2.23	Almacenes de material de profesores	100	25	80	
6.2.24	Salas de deportes, gimnasios, piscinas (uso general)	300	22	80	Para actividades más específicas, se deben usar los requisitos de la Norma EN 12193
6.2.25	Cantinas escolares	200	22	80	
6.2.26	Cocina	500	22	80	

3.3.1 Monitoreo del consumo de energía

El horario normal de actividades en el CEDIT es de 8:00 am a 8:00 pm de lunes a viernes y sábados de 8:00 am a 3:00 pm, haciendo un total de 68 horas promedio a la semana. Debido a la operación manual del sistema de iluminación, se presentan situaciones en las que se hace uso innecesario de la iluminación artificial, como es cuando el área de trabajo se encuentra desocupada o, como ya se ha mencionado, se tiene la presencia de la luz del día. A razón de esto, se calcula que el consumo de energía eléctrica en la zona B del CEDIT es aproximadamente 104.448 kWh por semana, lo que hace un total de 417.792 kWh mensuales.

3.3.2 Cuantificación de niveles de iluminación

A fin de justificar el uso del SICI, es necesario conocer el comportamiento de la iluminación en el área de trabajo, para ello, se implementó una red de sensores formada por seis módulos esclavos, SN-SX, y un coordinador, SN-C1.

Cada esclavo contiene un módulo de comunicación inalámbrica Xbee, un sensor SFH5711, y un filtro pasa bajas analógico con frecuencia de corte de 20 Hz (Figura 3.10a). El módulo Xbee está configurado para adquirir la señal del sensor a través uno de sus convertidores A/D (10 bits de resolución).

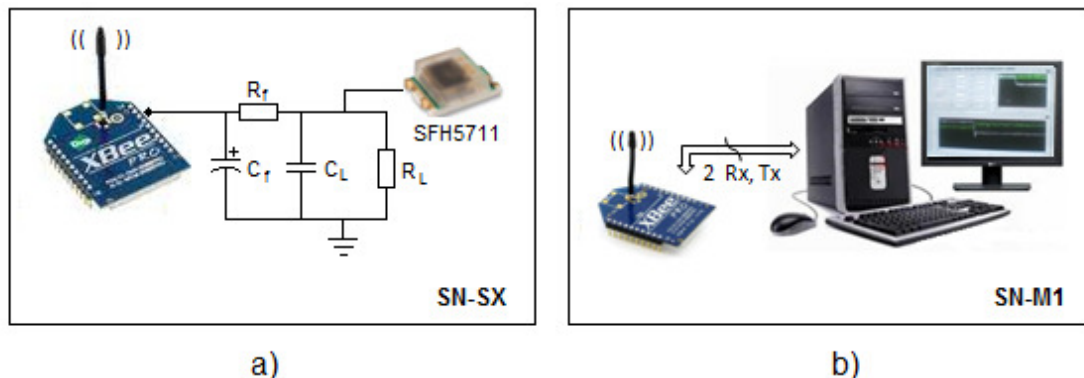


Figura 3. 10. Componentes de los nodos a) esclavos y b) coordinador, de la red de sensores para monitoreo de variables lumínicas en el espacio de trabajo.

El coordinador, consiste en un módulo Xbee conectado a una PC mediante el estándar de comunicación serial RS-232 (Figura 3.10b); en la PC se tiene una GUI que de manera continua, en lapsos de 10 minutos, solicita a todos los esclavos de la red el valor actual de la señal de su sensor, posteriormente, utilizando la Ecuación 3.1 lo convierte a su correspondiente valor en luxes y finalmente guarda la información.

Para la comunicación entre los dispositivos esclavos y el coordinador, se activó el modo de operación API (comando ATAP) de los módulos Xbee, el cual

proporciona alternativas para la configuración del módulo y ruteo de la información.

En general, son tres las principales opciones que ofrece el modo API: 1) transmitir paquetes de información (tramas de datos) a múltiples destinatarios sin entrar al modo de comandos, 2) recibir estado de éxito/falla de cada paquete RF transmitido y, 3) identificar la dirección de origen de cada paquete recibido.

Una trama de transmisión de información incluye:

- Frame de información RF transmitida (longitud de la trama, identificador de tipo de mensaje, identificador de datos, dirección de destino y dirección de la red).
- Trama de comandos (equivalente a comandos AT).

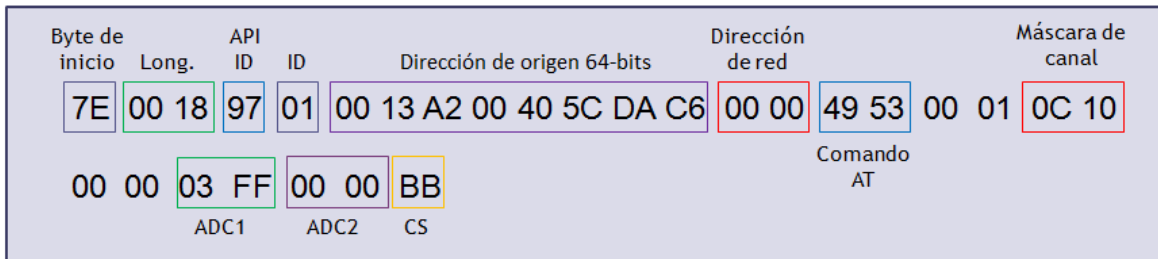
Mientras que una trama de recepción de información incluye:

- Trama de información RF recibida (longitud del frame, identificador del tipo de mensaje, identificador de datos, dirección de origen, dirección de la red, comando AT recibido).
- Comando de respuesta.
- Notificaciones de eventos como Reset, Associate, Disassociate, etc.

La primer estructura de la Figura 3.11 ejemplifica un frame programado para la leer las entradas analógicas y digitales del módulo de recepción (comando ATIS , IS= 0x49 0x53); la segunda estructura, corresponde al mensaje de respuesta, el cual contiene en la máscara de canal información sobre las entradas que se encuentran activadas, seguidas de su correspondiente valor (ADC1, ADC2).



a)



b)

Figura 3. 11. Ejemplos de estructura de datos API: a) estructura para leer el estado de las entradas analógicas y digitales de un módulo remoto, b) estructura de respuesta del módulo remoto.

La red de monitoreo de variables lumínicas ha sido diseñada para cuantificar el nivel de iluminación sobre el plano de trabajo, por lo que, los módulos esclavos SN-SX se colocaron sobre los escritorios del CEDIT distribuidos como se muestra en la Figura 3.12.

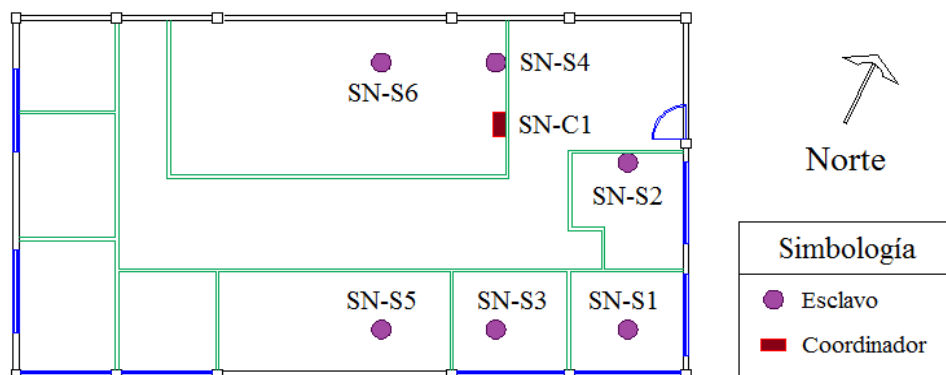


Figura 3. 12. Distribución de sensores en área de trabajo, para monitoreo de niveles de iluminación.

Los resultados obtenidos se presentan en las gráficas de la Figura 3.13, donde se comprueba que, en las zonas cercanas a las ventanas (sensores 1, 2, 3 y 5) el uso de la iluminación artificial no es necesaria durante algunas horas del día, ya que se tienen niveles de iluminación superiores a 300 luxes, alcanzando un valor máximo alrededor de las 10:00 am.

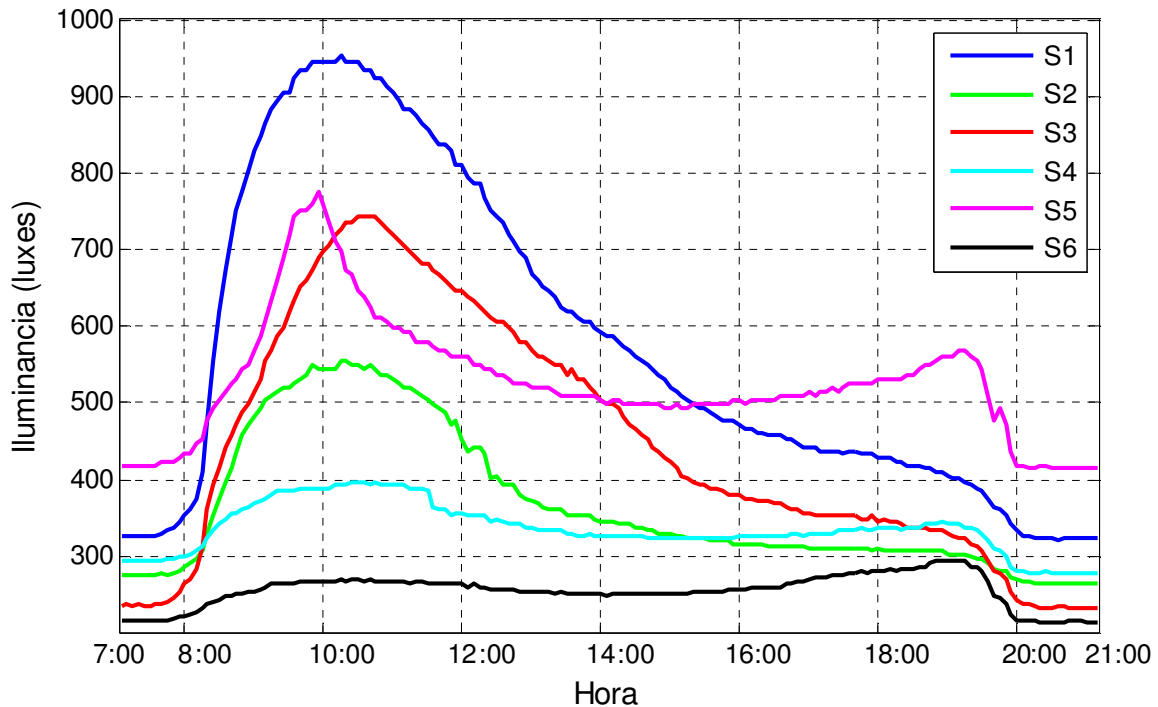


Figura 3. 13. Comportamiento de la iluminación natural en el interior del CEDIT, sin el uso del SICl.

3.4 Diseño del controlador

Debido a la no linealidad del sistema, el controlador propuesto comprende el uso de la técnica de control difuso, tomando como entradas el *Error* (diferencia entre el nivel de iluminación deseado y la lectura del sensor), y la *Pendiente* del mismo (de/dt), y como salida el nivel de VCD que debe suministrarse al balastro para variar el flujo luminoso de las lámparas. El rango de salida del controlador difuso es de -5 a 5 VCD, de modo que, al sumar la salida $y(k)$, a la señal de

control anterior $y(k - 1)$, se logran aplicar de 1 a 10 VCD a los balastos. El diagrama a bloques de la Figura 3.14 ilustra la estructura del controlador. Los componentes y el flujo de información del controlador difuso se muestran en la Figura 3.15.

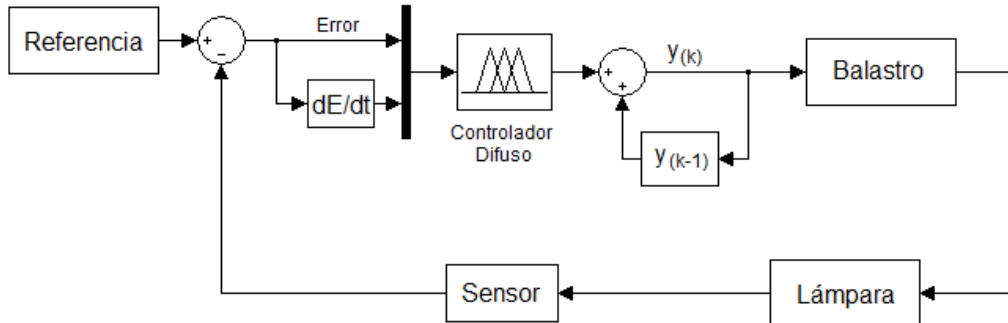


Figura 3. 14. Diagrama a bloques del controlador difuso propuesto para el SICl.

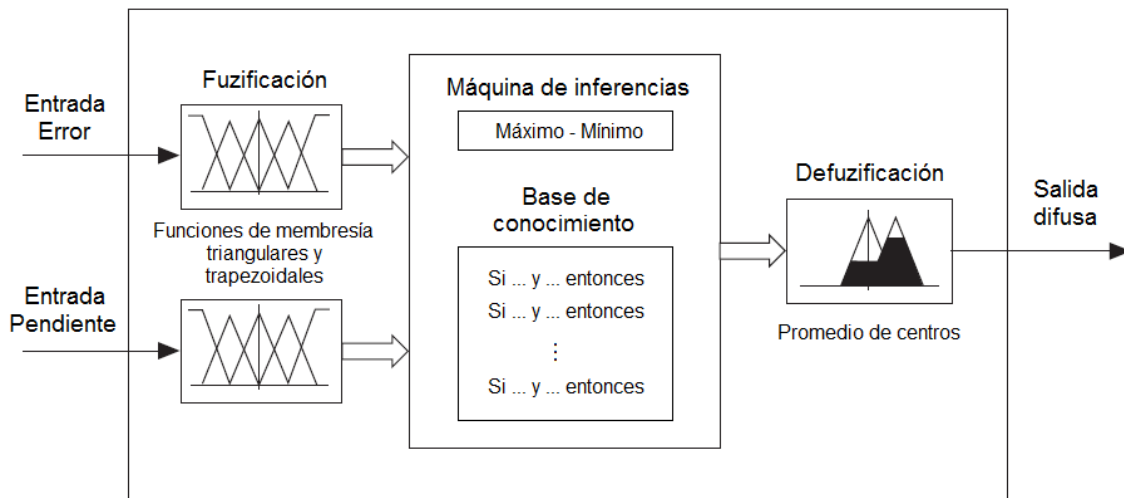


Figura 3. 15. Elementos del controlador difuso propuesto y su flujo de información.

Cada variable del controlador difuso propuesto, ya sea de entrada o de salida, usa funciones de membresía *triangulares* y *trapezoidales* con diferentes rangos de valores difusos.

- Variable de entrada *Error*: *NA* - Negativo Alto, *NB* – Negativo Bajo, *ZE* - Cero, *PB* - Positivo Bajo, *PA* - Positivo Alto (Figura 3.16).
- Variable de entrada *Pendiente*: *NA* - Negativa Alta, *NB* - Negativa Baja, *ZE* - Cero, *PB* – Positiva Baja, *PA* - Positiva Alta (Figura 3.17).
- Variable de salida *Nivel de VCD*: *DR* - Decrece Rápido, *DL* – Decrece Lento, *NC* - No cambia, *IL* – Incrementa Lento, *IR* – Incrementa Rápido (Figura 3.18).

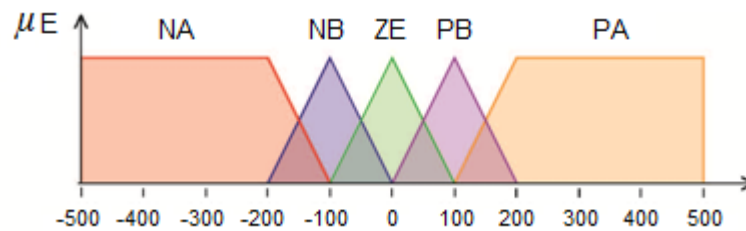


Figura 3. 16. Funciones de membresía para la variable de entrada *error*.

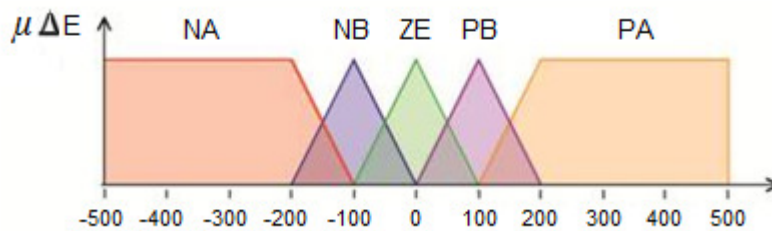


Figura 3. 17. Funciones de membresía para la variable de entrada *pendiente*.

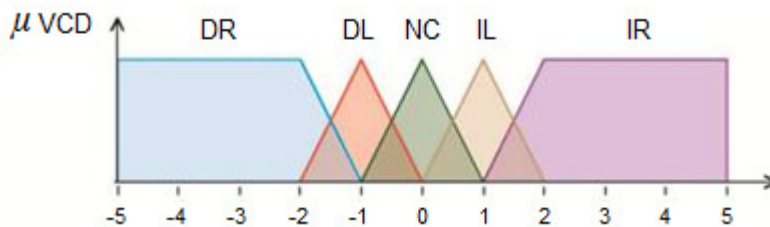


Figura 3. 18. Funciones de membresía para la variable de salida del controlador: *Nivel de VCD*.

La base de conocimiento está constituida por 25 reglas, siendo éste, el número total de posibles reglas de acuerdo a la cantidad de conjuntos difusos de cada variable de entrada (producto de los 5 conjuntos de la entrada Error y los 5 conjuntos de la entrada Pendiente); cabe mencionar que una base de conocimiento con al menos una regla activa para cada combinación posible de variables lingüísticas de entrada, es una base de conocimiento completa, en caso de ser incompleta, se debe especificar un término lingüístico por defecto para cada variable lingüística de salida, para que el controlador difuso pueda manejar este tipo de situaciones en las que no hay reglas activas.

En esta tesis, el conjunto de reglas establecidas para el sistema difuso propuesto es completo y se resume en la Tabla 3.3. La Figura 3.19 presenta la superficie de control generada en MatLab para la base de conocimiento y las funciones de membresía implementadas.

Tabla 3. 3. Base de conocimiento del controlador.

μ_y		dE/dt				
		NA	NB	ZE	PB	PA
Error	NA	DR	DR	DL	DL	NC
	NB	DR	DL	DL	NC	IL
	ZE	DL	DL	NC	IL	IL
	PB	DL	NC	IL	IL	IR
	PA	NC	IL	IL	IF	IR

El mecanismo de inferencias utilizado corresponde al *máximo del mínimo*. En este mecanismo para cada regla activa se calcula el valor mínimo de grado de pertenencia de los conjuntos difusos implicados (μ_E, μ_{dE}) y se asigna al conjunto difuso de salida correspondiente (μ_{VCD}). Dado que en más de una regla el conjunto difuso de salida es el mismo, el valor de grado de pertenencia final para cada conjunto de salida activo es el máximo de los valores mínimos calculados.

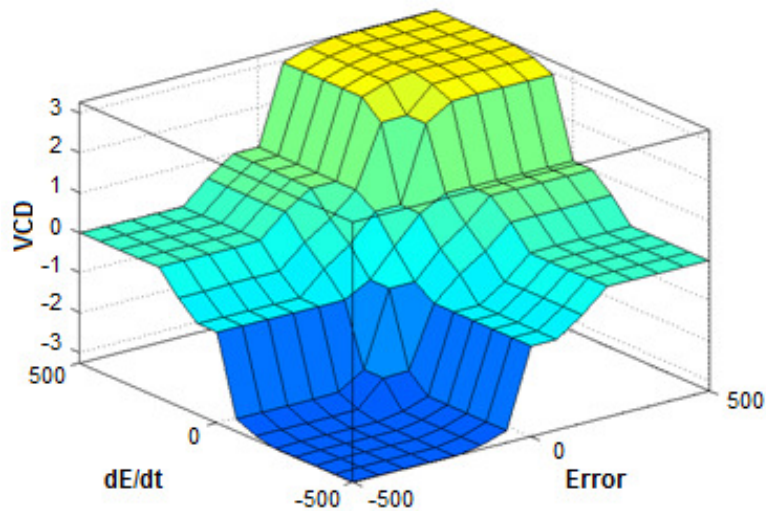


Figura 3. 19. Superficie de control generada en MatLab a partir de los conjuntos difusos y la base de reglas del controlador difuso propuesto

Finalmente, en la etapa de defuzificación se utiliza el método *promedio de centros* (Ecuación 2.9), debido a su buen desempeño en aplicaciones de lazo cerrado, a la continuidad en su salida y al mediano requerimiento computacional que demanda en su cálculo.

3.5 Validación del controlador

Antes de incorporar en hardware el controlador difuso diseñado, es necesario validar su funcionamiento desde una PC; para ello, se hace uso de la herramienta Fuzzy Control de LabView y la tarjeta de adquisición de datos ADVANTECH USB 4711, a fin de facilitar la construcción del sistema.

Fuzzy Control es una herramienta gráfica muy completa, que ofrece facilidad para implementar el controlador difuso que el programador desee, al tener opciones de configuración en lo que refiere a métodos de fuzificación, tipos de funciones de membresía, métodos de defuzificación y máquina de inferencias.

La ADVANTECH USB 4711, es una tarjeta de adquisición de datos de 12 bits de resolución e interfaz USB, velocidad de muestreo de hasta 100 kS/s. 16 canales para entradas analógicas (3.3, 5 V) con su respectivo convertidor analógico a digital (A/D), 16 canales para entradas/salidas digitales y 2 canales para salidas analógicas (0-5, 0-10, ± 5 y ± 10 V).

La Figura 3.20 ilustra la conexión para el funcionamiento del sistema. La ADVANTECH USB 4711 adquiere la señal del sensor mediante una de sus entradas analógicas, la convierte a dato digital y lo envía a la PC. El controlador difuso en la PC, calcula y envía a una de las salidas Analógicas de la tarjeta de adquisición, la señal de control que debe aplicarse al balastro (0-10 V).

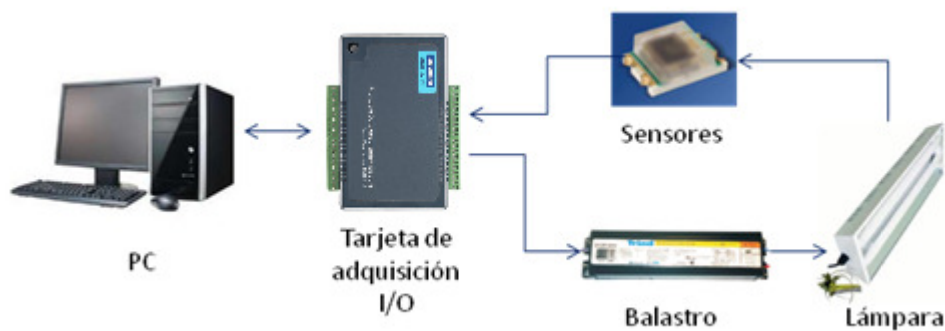


Figura 3. 20. Esquema y líneas de flujo del sistema para la validación del controlador de iluminación difuso.

Al seleccionar diferentes niveles de iluminación, durante las pruebas del controlador, éste muestra un desempeño favorable, en el que el sistema alcanza la referencia y se estabiliza en un tiempo aproximado de 3.5 segundos, la estabilidad del sistema evita la presencia de parpadeos que molesten la percepción visual del usuario. La Figura 3.21 muestra la implementación física para la validación del sistema.

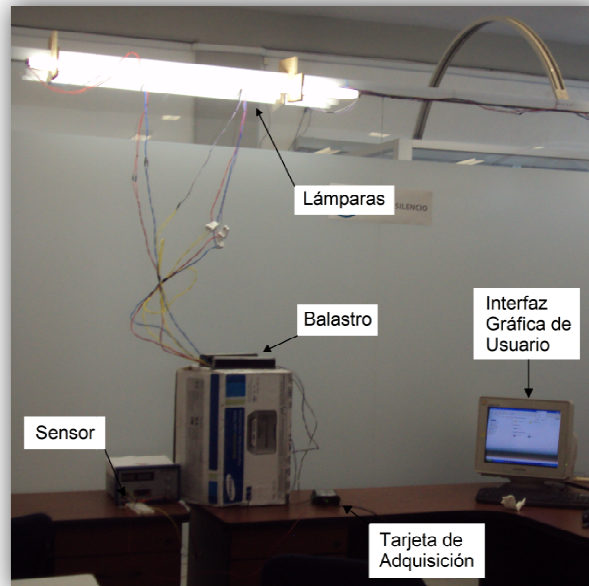


Figura 3. 21. Implementación física del sistema para la validación del controlador.

La Figura 3.22 muestra la respuesta del sistema a diferentes valores de referencia establecidos desde la GUI. El primer valor de iluminación solicitado, correspondiente a 350 luxes, el cual es superior a lo que las lámparas son capaces de suministrar con la salida mínima del controlador, por lo cual no es alcanzada; los siguientes valores, en orden ascendente: 400, 500, 600 y 700 luxes, son alcanzados sin ninguna dificultad. Así como los valores en descenso de 700, 650, 500 y 400 luxes.

A mitad de la gráfica, se observa que el sistema no alcanza la referencia de 800 luxes, lo cual se debe a las limitantes físicas del propio sistema, es decir, las lámparas, no son capaces de suministrar mayor flujo luminoso. En el penúltimo valor de referencia solicitado, se repite el comportamiento obtenido a principios de la gráfica, el sistema nuevamente no es capaz de generar una menor salida.

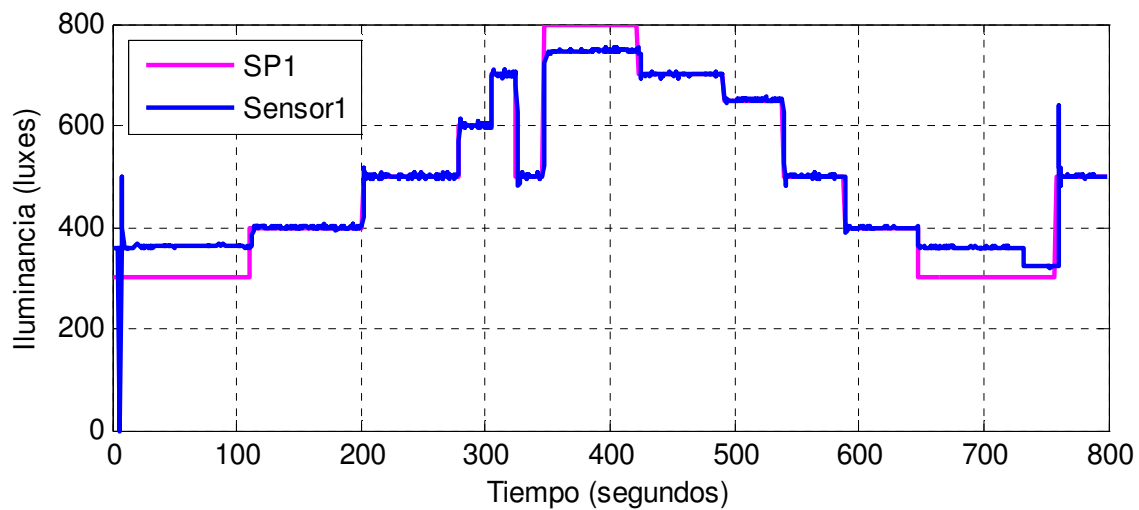


Figura 3. 22. Respuesta del módulo SNLC-S1 a diferentes valores de referencia.

Los picos observados en la gráfica de la figura 3.22, se deben a que el controlador fue programado para iniciar con una señal de control de 10 VCD cada vez que se enciende el sistema, provocando una salida máxima de flujo luminoso de las lámparas. El tiempo de respuesta del controlador varía de acuerdo a la amplitud del escalón de la referencia deseada, siendo en promedio, inferior a 3.5 segundos.

La Figura 3.23 grafica la señal de control analógica aplicada a los balastos para cada valor de referencia solicitado. En ésta Figura es posible observar la capacidad del controlador para apagar las luminarias cuando la referencia establecida es inferior a la salida mínima que las lámparas son capaces de proporcionar.

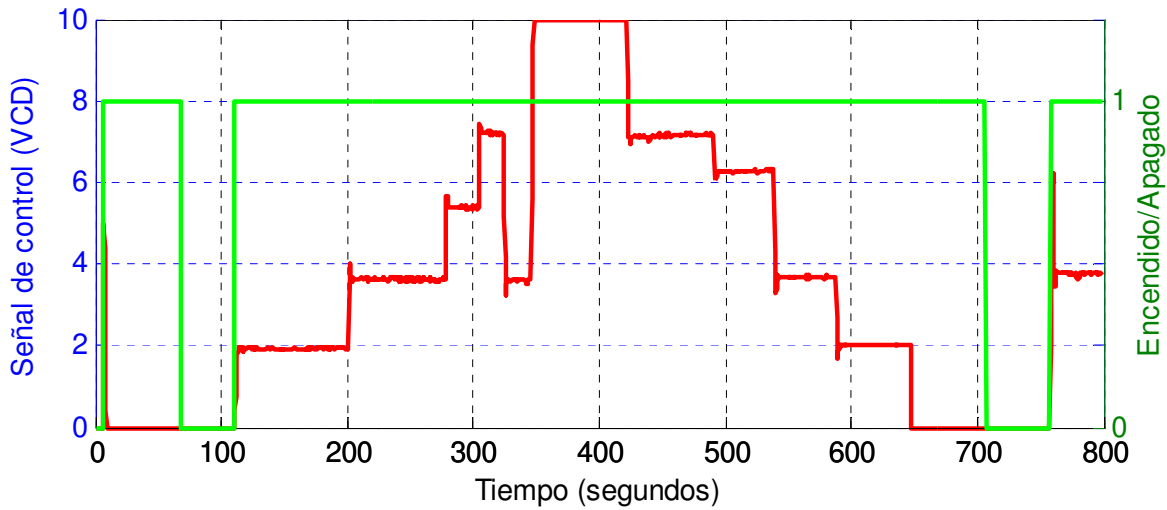


Figura 3. 23. Señal de control aplicada al módulo SNLC-S1 y señal de control para 1- encender/ 0-apagar las luminarias.

3.6 Protocolo de comunicación del Sistema

Para que el funcionamiento del sistema sea eficaz, es necesario establecer entre los componentes del sistema un protocolo de comunicación de fácil interpretación, para ello se establecen dos tipos de mensajes (Figura 3.24):

1 Byte	1 Byte		2 Bytes		1 Byte
Inicio de trama	Dirección de grupo	Dirección de esclavo	Comando	Valor	Fin de trama

a) Mensaje de solicitud

1 Byte	1 Byte		2 Bytes	1 Byte
Inicio de trama	Dirección de grupo	Dirección de esclavo	Valor	Fin de trama

b) Mensaje de respuesta

Figura 3. 24. Estructuras de datos del protocolo de comunicación para el intercambio de información entre los nodos del SICI.

- Mensaje de solicitud, enviado del maestro hacia los esclavos de la red. Contiene:
 - 1 byte de inicio = 0x4F.
 - 1 byte dirección de destino: 4 bits para dirección de grupo y 4 bits para dirección individual.
 - 2 bytes para comando y valor: 4 bits de comando y 12 bits de valor, con lo que es posible representar hasta un valor máximo de 4095.
 - 1 byte de fin de trama = 0x7E.
- Mensaje de respuesta, enviado desde un esclavo hacia el maestro. Contiene:
 - 1 byte de inicio = 0x4F.
 - 1 byte de dirección, que permite al módulo maestro identificar que esclavo está respondiendo.
 - 1 byte de valor.
 - 1 byte para fin de trama = 0x4E.

3.6.1 Dirección

Pese a que con el tamaño del bus de dirección es posible representar 256 direcciones diferentes, la red ha sido limitada para establecer un máximo de 16 grupos y 4 direcciones individuales en cada grupo, lo que limita el SICI a 64 elementos esclavos. La selección del tamaño de la red básicamente se debe a la distancia de alcance para el tipo de red configurada (punto-multipunto) con base en el tipo de material de construcción del edificio. Los muros de concreto provocan interferencia en la comunicación de los dispositivos, lo que provoca pérdida de confiabilidad en la entrega de datos (Jang and Healy, 2009).

No obstante en caso de optar por otro tipo de configuración es posible expandir la red para tener mayor cobertura en cuanto a la cantidad de elementos y distancia de alcance.

3.6.2 Comando y valor

Los comandos son instrucciones que la unidad maestra envía a las unidades esclavas para consultar o modificar su funcionamiento. El SICI cuenta con ocho comandos predeterminados. La Tabla 3.4 lista los comandos, indica el modo de control en que se encuentran disponibles y su forma de transmisión.

Tabla 3. 4. Modo de operación y transmisión de los comandos del SICI.

No.	Comando	Disponible en control		Modo de transmisión
		convencional	automático	
00	Activar control automático	No aplica	No aplica	Grupal
01	Activar control convencional	No aplica	No aplica	Grupal
02	Establecer SP	–	✓	Individual o grupal
03	Encender/Apagar	✓	–	Individual o grupal
04	Solicitar nivel de iluminación a esclavo	✓	✓	Individual o grupal
05	Solicitar estado de esclavo	✓	–	Individual o grupal
06	Consultar SP de esclavo	–	✓	Individual o grupal
07	Establecer escena de iluminación	✓	–	Individual o grupal

La tabla 3.5, contiene la descripción de los comandos, su posible valor y el valor de respuesta que se espera recibir del módulo esclavo.

Tabla 3. 5. Descripción de los comandos establecidos en el protocolo de comunicación del SICI.

No.	Comando	Descripción	Valor	Respuesta
00	Activar control automático	Activa el controlador difuso en todo el sistema mediante una retransmisión. Además activa en la GUI los comandos que permiten manipular los parámetros de funcionamiento del controlador.	No aplica	Éxito/Falla
01	Activar control convencional	Desactiva el controlador difuso en todo el sistema mediante una retransmisión. Activa en la GUI los comandos que permiten manipular el SICI en modo convencional.	No aplica	Éxito/Falla
02	Establecer SP	Permite modificar la referencia del controlador (<i>set point</i>). A fin de establecer el nivel de iluminación deseado en el área de trabajo.	0-1000 luxes	Éxito/Falla
03	Encender/ Apagar	Permite Encender / Apagar el sistema desde la GUI cuando el control convencional se encuentra activo.	1-encender/ 0-apagar	Éxito/Falla
04	Solicitar nivel de iluminación a esclavo	En control convencional o automático, permite solicitar el nivel de iluminación del sensor de iluminación.	No aplica	Valor en luxes
05	Solicitar estado de esclavo	Este comando permite saber si el esclavo se encuentra encendido o apagado cuando el controlador automático se encuentra activo.	No aplica	1-encendido/ 0-apagado
06	Consultar SP de esclavo	Permite consultar el valor de referencia establecido en el controlador difuso.	No aplica	Valor en luxes
07	Establecer escena de iluminación	Hace analogía a un dimmer, al permitir regular el flujo luminoso de las lámparas en 10 porcentajes diferentes.	10-100%	Éxito/Falla

3.6.2.1 Escenas de iluminación

Una escena de iluminación corresponde a un valor en porcentaje de regulación del flujo luminoso de las lámparas. En el SICI es posible tener 10 escenas de iluminación diferentes. De forma predefinida los valores para cada escena son los que se indican en la Tabla 3.6, y corresponden a incrementos unitarios en la señal de control analógica que se aplica al balastro (1-10 VCD). El usuario puede modificar desde la GUI los valores predefinidos, a fin de obtener un nivel de iluminación específico en el área de trabajo en función del porcentaje establecido.

Tabla 3. 6. Valores predeterminados para las escenas de iluminación.

No. de escena	Valor (% de regulación de flujo luminoso)	No. de escena	Valor (% de regulación de flujo luminoso)
1	10	6	60
2	20	7	70
3	30	8	80
4	40	9	90
5	50	10	100

3.7 Incorporación del sistema en hardware

Una vez validado el funcionamiento del controlador y del protocolo de comunicación, se realiza la instrumentación necesaria para el desarrollo del hardware que permita la independencia del sistema en cuanto a comunicación y fuente de energía (Figura 3.25). El módulo maestro (SNLC-M, Sensor Network Lighting Control - Master), sigue constando de una computadora y un módulo XBee configurado como coordinador de la red, y como ya se ha mencionado, es el encargado de enviar información a los módulos esclavos (SNLC-SX, Sensor Network Lighting control – Slave X) e interpretar sus mensajes de respuesta.

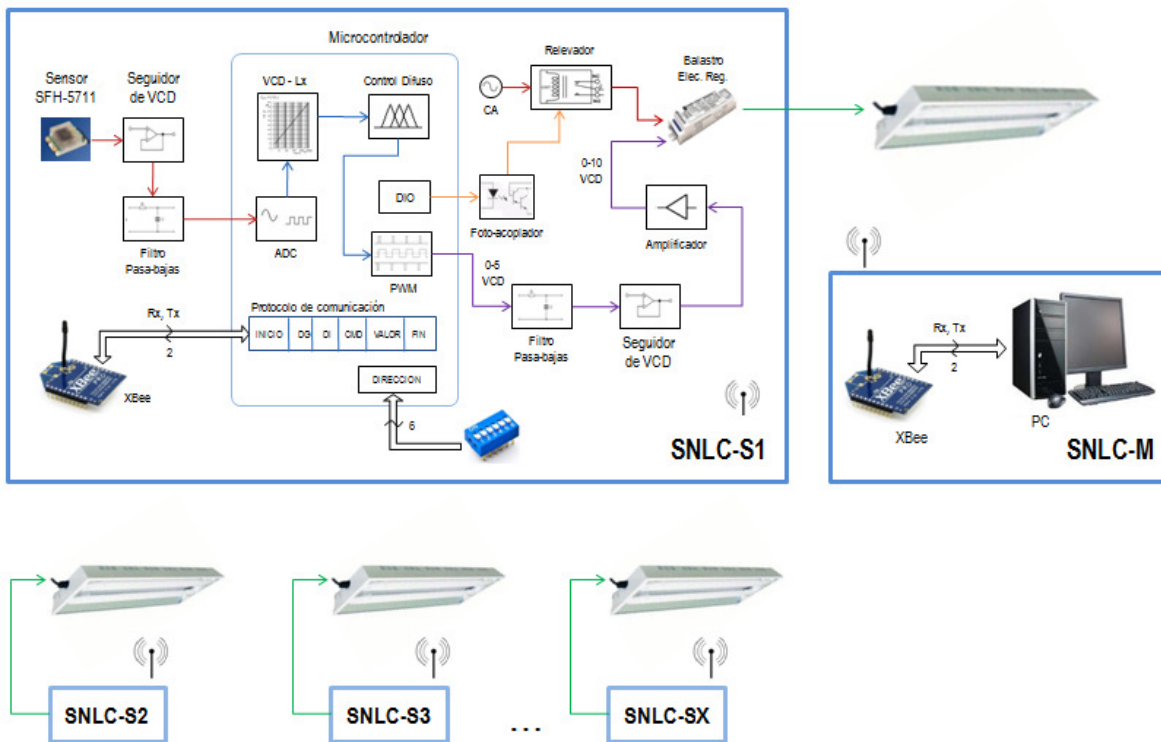


Figura 3. 25. Hardware implementado para los nodos esclavo y maestro del sistema de control de iluminación.

En el módulo esclavo, se tiene el sensor de iluminación SFH5711 conectado en la configuración recomendada por el fabricante (Figura 3.7), y un filtro analógico pasa-bajas de primer orden con frecuencia de corte de 4.97 Hz, donde $C = 47 \mu F$ y $R = 680 K\Omega$.

En el microcontrolador (PIC18F4550) se tiene incorporado el algoritmo de control difuso, el algoritmo para la interpretación del protocolo de comunicación, la ecuación matemática que convierte la señal del sensor a su correspondiente valor en luxes y la lectura de la dirección de cada esclavo (apéndice A.1). Además, se tiene configurado un módulo de salida PWM (CCP2) para generar la señal de respuesta del controlador, así como una salida digital (RA1) para controlar el encendido/apagado de las lámparas.

Para obtener el voltaje promedio de la señal PWM (señal de control), se hace pasar ésta por un filtro pasa-bajas analógico de primer orden con frecuencia de corte de 221 Hz, $C = 0.1\mu F$ y $R = 8.2 K\Omega$. La nueva señal de 0-5 VDC, es amplificada con ganancia de 2, de manera que se genera la señal que requieren los balastos para controlar el flujo luminoso de las lámparas. El cálculo de los valores de R para los filtros del sensor y la señal PWM se presentan a continuación:

Sensor SFH5711:

$$f_c = 4.97 \text{ Hz}$$

$$C = 47 \mu F$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f_c} = 680\Omega$$

Señal PWM:

$$f_c = 221 \text{ Hz}$$

$$C = 47 \mu F$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f_c} = 8.2K\Omega$$

La señal de control generada, así como la señal del sensor, utilizan un seguidor de voltaje antes de ser conectadas a su dispositivo final, esto con el objetivo de mantener el voltaje y la corriente del circuito, al acoplar impedancias.

En la salida digital configurada para encender/apagar las lámparas, se tiene conectado un relevador, no sin antes proteger el circuito digital con un fotoacoplador darlington (4N32SN). Por último, la dirección del esclavo (grupo e individuo) es configurable mediante un DIP Switch y leída en el puerto D del microcontrolador.

El flujo de la información en el módulo esclavo es el siguiente: la señal analógica del sensor es adquirida continuamente mediante el convertidor A/D0 en pin AN0 del microcontrolador, ésta señal se convierte a luxes. En caso de que el sistema esté en modo de operación automática, es decir, con el controlador difuso activo, se calcula el Error y su Pendiente (entradas del controlador), se ejecuta el

algoritmo difuso y se obtiene la salida del controlador mediante el puerto PWM2 (CCP2); la señal de control es filtrada, amplificada y aplicada a las terminales de control del balastro, para así, regular la intensidad luminosa.

Para la comunicación con el maestro, el esclavo tiene incorporado un módulo de comunicación inalámbrica Zigbee en modo de Transmisión/Recepción, de manera que siempre que llegue un paquete de datos, éste es enviado al microcontrolador para su interpretación y ejecución de comandos, y por el mismo medio responde con la información solicitada o envía un mensaje de éxito o falla. En el apéndice A.2 se muestra el diagrama electrónico de un módulo SNLC-SX.

3.8 Validación del amplificador de voltaje

La Figura 3.26, grafica el voltaje medio que idealmente corresponde a la salida PWM del microcontrolador, contra la salida real del mismo y el voltaje filtrado en la salida del seguidor. En la parte superior de las barras se indica el valor de Error que existe entre el voltaje PWM ideal y el voltaje a la salida del seguidor, el cual en todos los casos resulta inferior a 1%.

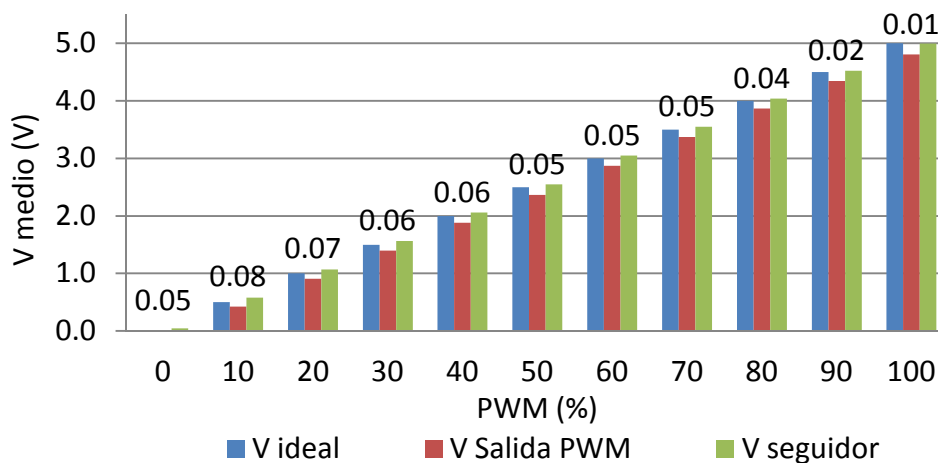


Figura 3. 26. Comparación entre el voltaje ideal PWM, el voltaje PWM real a la salida del microcontrolador y el voltaje real después del seguidor.

El circuito integrado que se utiliza para el seguidor y amplificador de la señal PWM, corresponde al amplificador operacional con número de parte LM324ADR de Texas Instruments. La Figura 3.27 hace una comparación entre el voltaje ideal a la salida del amplificador y el voltaje real generado. El índice de correlación entre estas variables es de 0.999, lo que indica una relación positiva casi perfecta, cuando una de las variables aumenta la otra también lo hace en proporción constante, es decir son linealmente dependientes.

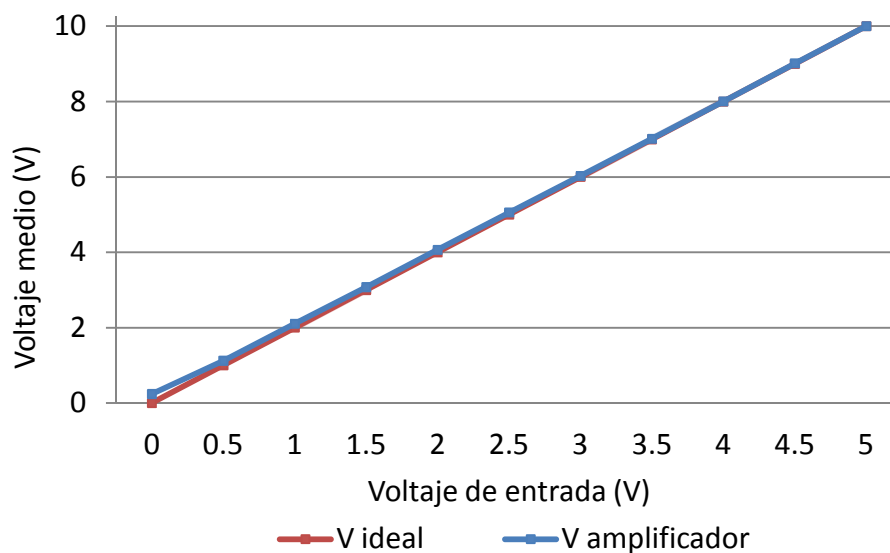


Figura 3. 27. Comparación entre la señal de control analógica ideal generada a partir del voltaje PWM del microcontrolador (0-5 VCD) y el voltaje real a la salida del amplificador (0-10 VCD).

3.9 Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

En una primera etapa el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario fue realizado en LabView debido a la facilidad de uso que ofrecen sus múltiples herramientas. Finalmente la GUI fue diseñada en Java, ya que además de ser independiente de la plataforma de trabajo, es de fácil programación y una fuente abierta por la que no se tienen que pagar impuestos sobre patentes.

Como ya se mencionó la GUI ofrecen dos modos de controlar el sistema: *convencional* y *automático*, y a través de ella posible operar los componentes del sistema (SNLC-SX) de forma grupal o individual. Los diagramas a bloques de las Figuras 3.28 y 3.29, detallan con mayor claridad las opciones que se tienen disponibles en cada modo de operación.

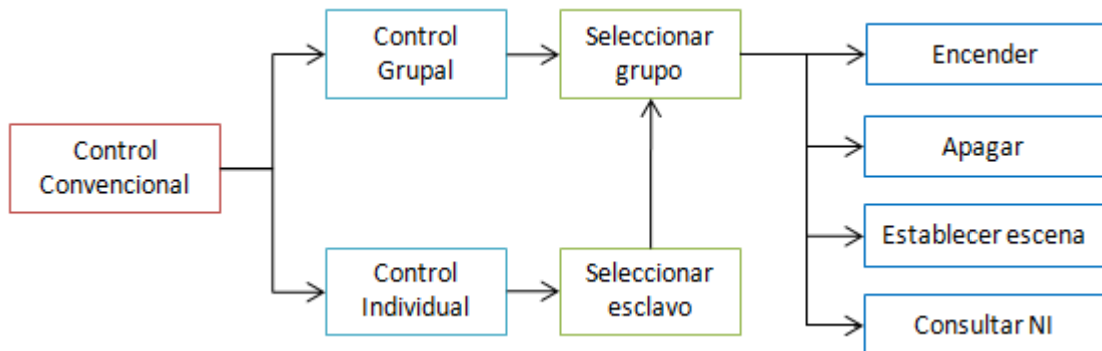


Figura 3. 28. Opciones disponibles en la GUI para el modo de operación convencional.

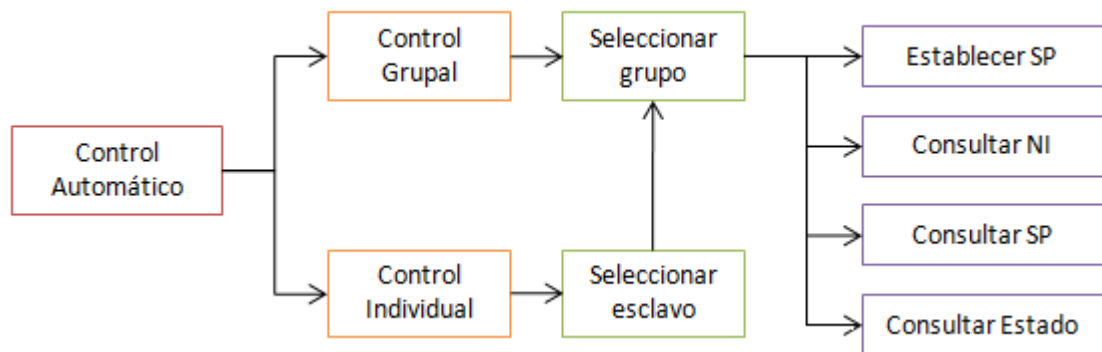


Figura 3. 29. Opciones disponibles en la GUI para el modo de operación automático.

El diagrama de flujo de la Figura 3.30 muestra la lógica de funcionamiento de la GUI para cada modo de operación del SICI. En esta figura es posible observar que cuando el usuario elige manipular el sistema por grupos, la GUI

retransmite de manera automática el comando elegido a cada uno de los esclavos (SNLC-Sx) del grupo.

Los cuatro pasos principales que el usuario debe seguir para poner en funcionamiento el SICI a través de la GUI son los siguientes:

- Establecer tipo de control para el sistema (convencional o automático).
- Seleccionar el modo de operación (grupal o individual).
- Asignar dirección de destino. En modo de operación grupal sólo es necesario especificar el número de grupo que se desea manipular. En modo de operación individual se debe especificar el número de esclavo a controlar dentro del grupo seleccionado.
- Elegir un comando, y en caso de requerirlo establecer el valor.

En modo grupal, no es necesario establecer una dirección individual, ya que el programa de la GUI, envía consecutivamente el comando elegido a cada uno de los esclavos que pertenecen al grupo. El apéndice A.3 contiene la impresión de pantallas de la interfaz gráfica desarrollada.

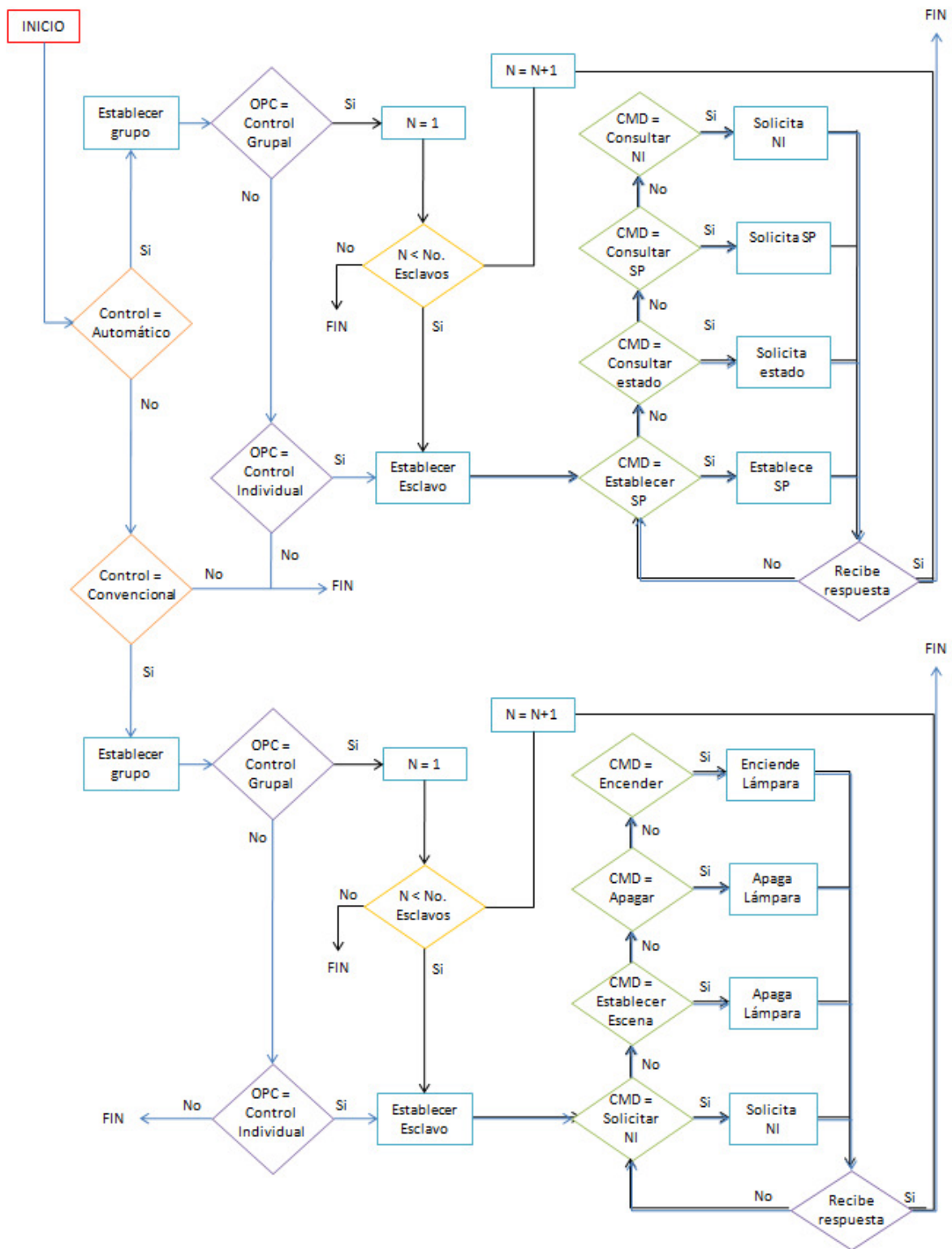


Figura 3. 30. Diagrama de flujo de información en la programación de la GUI para el envío de comandos a los módulos esclavos (SNLC-SX).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas al SICI operado desde la GUI desarrollada, se presenta el monitoreo de los niveles de iluminación alcanzados en el área de trabajo y finalmente se hace un análisis del consumo de energía eléctrica.

4.1 Implementación y funcionamiento del SICI

Las pruebas realizadas al SICI se efectuaron en la sala B9 del CEDIT, donde se realizan actividades de investigación que involucran en mayor parte lectura y escritura desde una computadora personal. De acuerdo a la Norma UNE-EN 12464-1 el nivel de iluminación en la sala B9 debe ser de 300 luxes. Este valor ha sido asignado de manera predeterminada en el controlador, sin embargo, puede ser modificado desde la GUI utilizando el comando “establecer SP”. La instalación e implementación física del SICI se muestra en la Figura 4.1.

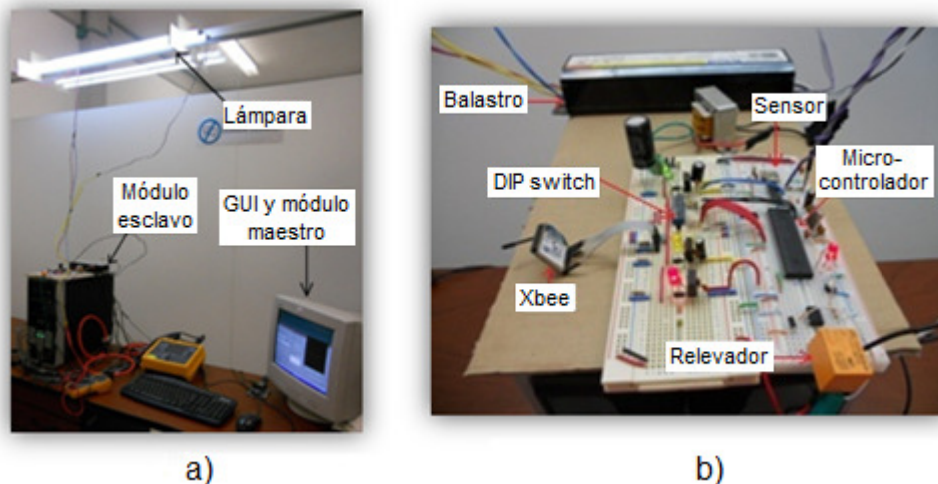


Figura 4. 1. Instalación e implementación física del SICI. a) Instalación física de los componentes del sistema, b) Elementos principales del módulo esclavo SNLC-S1.

4.2 Operación del sistema en modo de control convencional

En modo de operación convencional, se probaron las funciones que ofrece el sistema, tales como el control de la intensidad luminosa mediante asignación de escenas, encendido y apagado de las lámparas.

Las imágenes de la Figura 4.2 muestran la salida del sistema para seis casos diferentes: a) lámpara encendida, b) lámpara apagada, c) escena 1, porcentaje de regulación de 10%, d) escena 3, porcentaje de regulación de 30%, e) escena 6, porcentaje de regulación de 60% y f) escena 10, porcentaje de regulación de 100%.

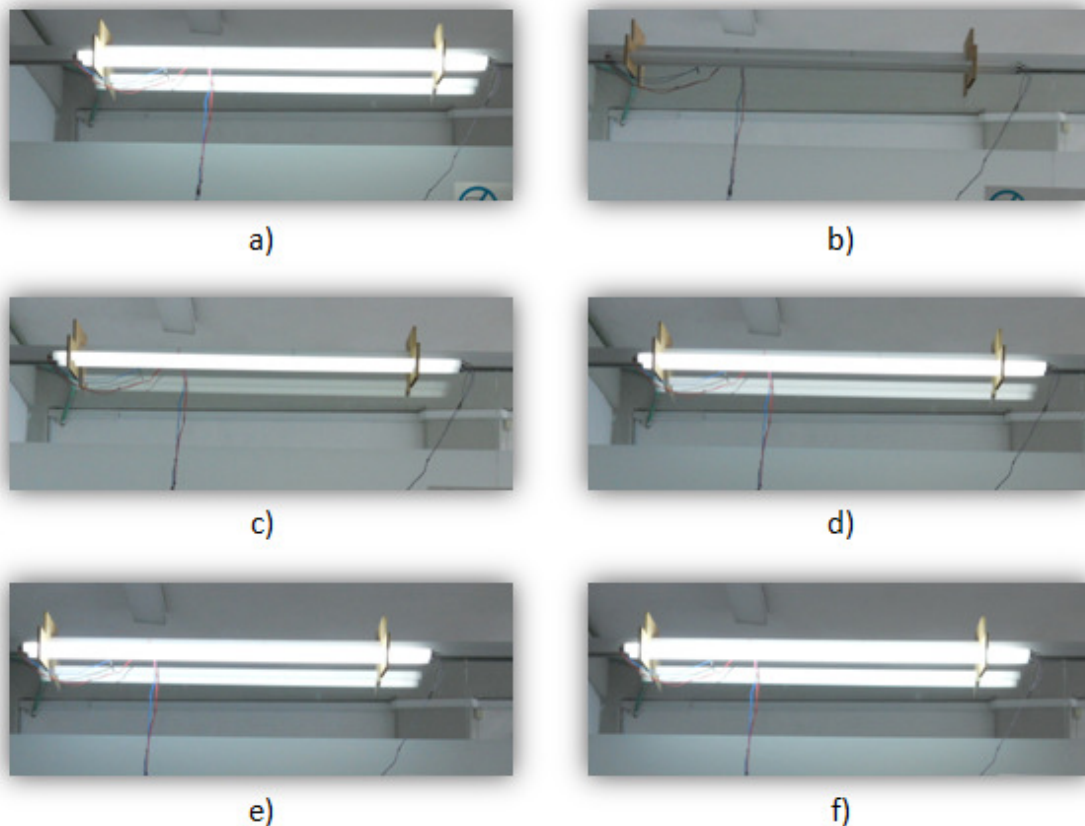


Figura 4. 2. Respuesta del sistema a comandos de control convencional: a) encender, b) apagar, c) escena 1, d) escena 3, e) escena 6 y f) escena 10.

4.2.1 Consumo de energía eléctrica

Debido a las características de diseño del balastro SLI 8137, su consumo de energía eléctrica disminuye toda vez que la señal de control aplicada también lo hace. La gráfica de la Figura 4.3 registra el consumo de potencia activa y potencia aparente del módulo esclavo SNLC-S1, al establecer por lapsos de 30 minutos y en orden descendente las 10 escenas de iluminación predeterminadas en la GUI del SICI. Las cuales corresponden a escalones unitarios en la señal de control analógica del balastro (10 a 1 VCD).

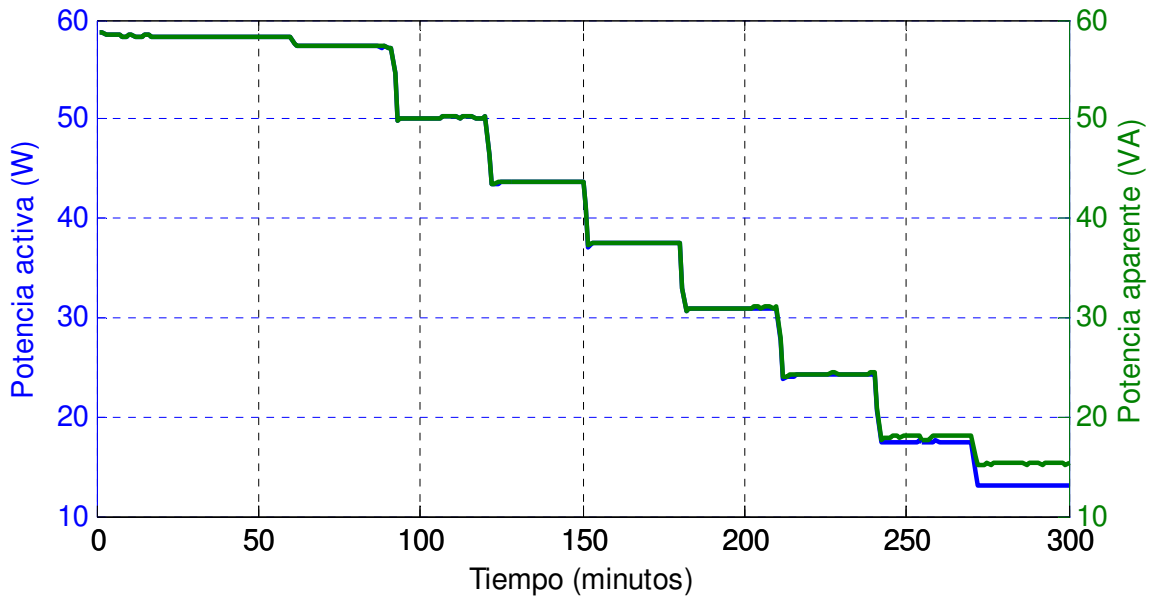


Figura 4. 3. Consumo de potencia activa y potencia aparente al variar la señal de control del balastro de 10 a 1 VCD.

Para un sistema eléctrico de potencia, la relación existente entre el consumo de potencia aparente y el consumo de potencia activa determinan el valor de su factor de potencia FP , de acuerdo a la Ecuación 4.1.

$$FP = \cos \varphi = \frac{P (W)}{|S| (VAR)} \quad (4.1)$$

Donde

P es la potencia activa en Watts,

S la potencia aparente en VAR y

φ el ángulo que forman los fasores de la corriente y la tensión.

A partir de los datos que generan la Figura 4.3 se obtiene que con señales de control superiores a 2VCD el valor de FP disminuye 1.01% (de 0.99 a 0.98, ver Figura 4.4) debido a que los valores de S y P decrecen de manera proporcional. Para la señal de control de 2 VCD P disminuye 5.61% de su valor máximo, mientras S lo hace en 5.31%, reduciendo FP de 0.995 a 0.963. Por último, para la señal de control de 1 VCD P disminuye 12.98% y S 1.48%, provocando que FP se reduzca de 0.963 a 0.846.

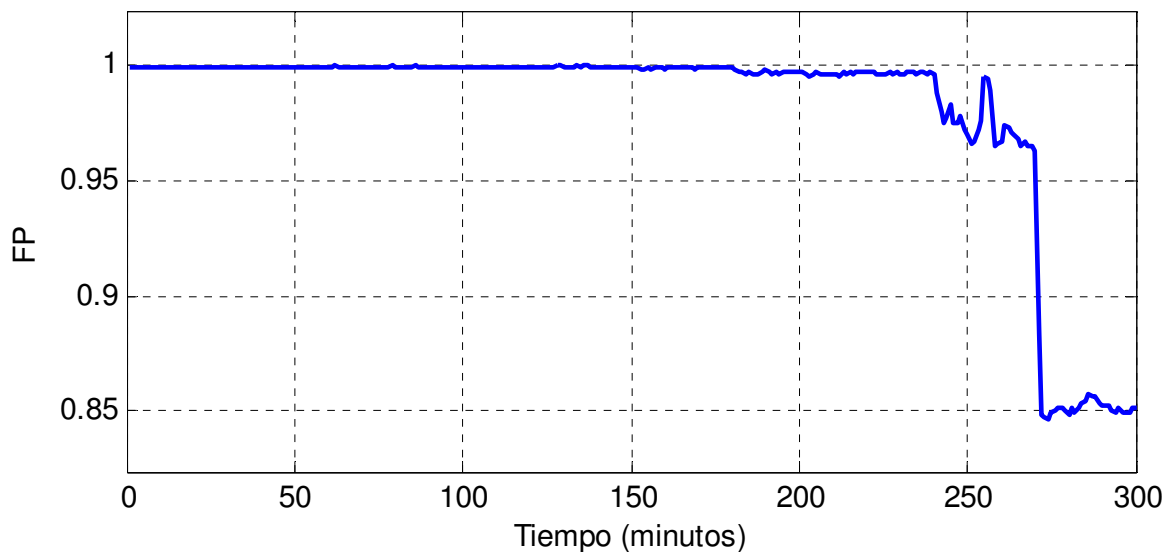


Figura 4. 4. Factor de potencia del balastro al variar la señal de control de 10 a 1 VCD.

El factor de potencia de 0.99 característico del SLI 8137 hace que éste demande menos corriente que otro balastro con un factor de potencia inferior. No obstante, al asignar escenas de iluminación que correspondan a valores menores

de la máxima señal de control se obtendrá un ahorro extra de energía eléctrica. La Figura 4.5 presenta el consumo de corriente que el sistema demanda, mientras que la Figura 4.6 grafica la tensión de la línea de alimentación.

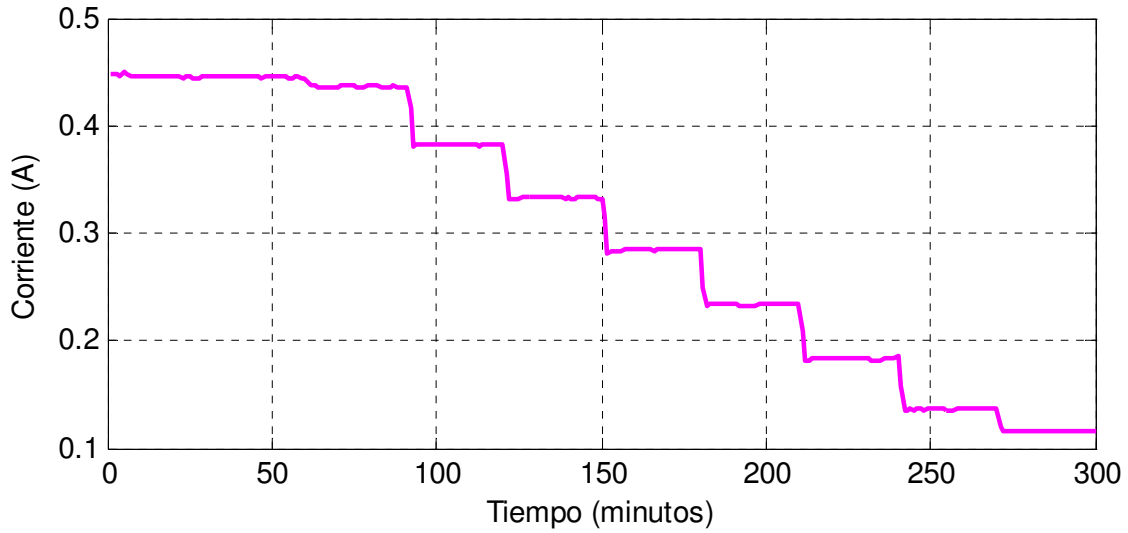


Figura 4. 5. Corriente consumida por el balastro al variar la señal de control de 10 a 1 VCD.

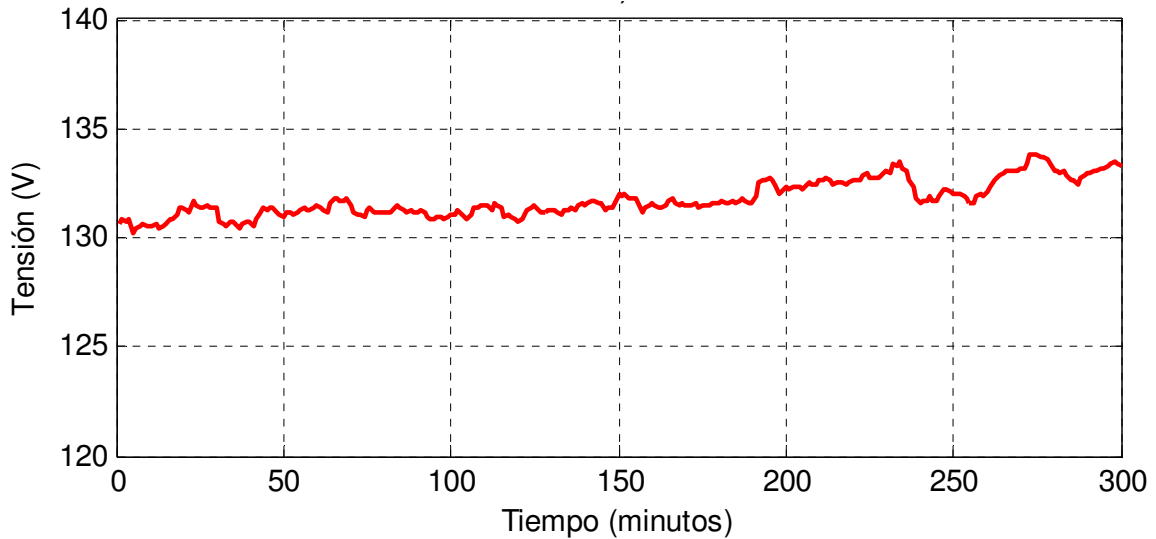


Figura 4. 6. Tensión de línea al variar la señal de control de 10 a 1 VCD.

La gráfica de la Figura 4.7 hace una comparación entre el consumo nominal de energía activa del balastro (29.239 Wh) y el consumo obtenido al establecer cada una de las 10 escenas de iluminación. En la Tabla 4.1 se presenta el porcentaje de consumo de energía activa para cada escena de iluminación con base en el consumo nominal del balastro operando al 100% de su capacidad. Se obtiene que el ahorro de energía eléctrica varía en un rango de 0 a 77.45% para las señales de control de 10 a 1 VCD respectivamente.

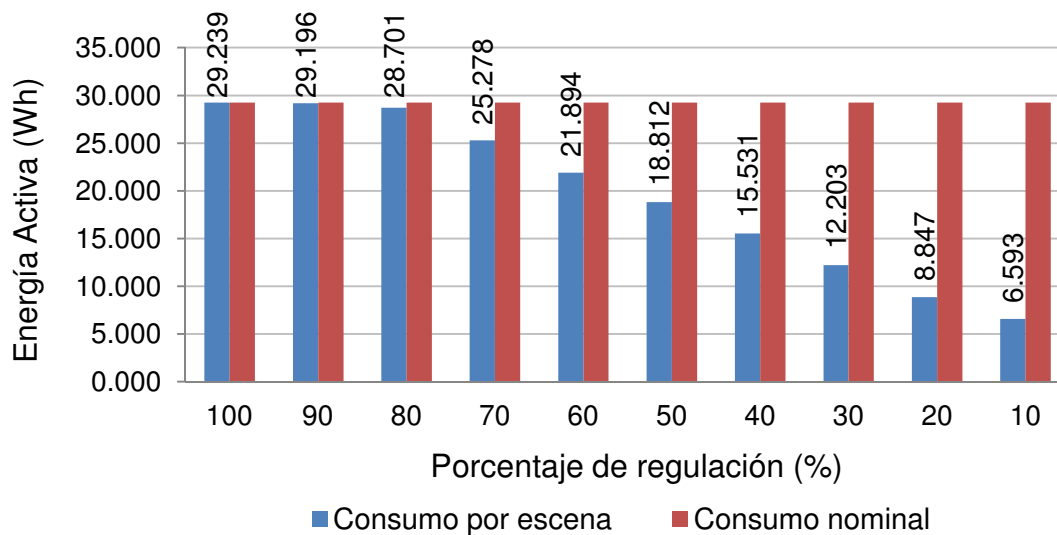


Figura 4. 7. Comparación entre el consumo de energía del balastro operando al 100% de su capacidad y el consumo en cada escena de iluminación.

Tabla 4. 1. Consumo de energía eléctrica (EE) del sistema, para diferentes señales de control aplicadas.

Señal de control (VCD)	Consumo de EE (%)	Ahorro de EE (%)	Señal de control (VCD)	Consumo de EE (%)	Ahorro de EE (%)
10	100.00	0	5	64.34	35.66
9	99.85	0.15	4	53.12	46.88
8	98.16	1.84	3	41.74	58.26
7	86.45	13.55	2	30.26	69.74
6	74.88	25.12	1	22.55	77.45

4.2.2 Iluminancia en el área de trabajo

La combinación del flujo luminoso de las lámparas y el de la luz natural que inciden sobre el área de trabajo determina el valor total de la luminancia. La Figura 4.8 presenta el nivel de iluminación censado en el área de trabajo y el porcentaje de flujo luminoso que las lámparas emiten al variar en orden descendente la señal de control aplicada al balastro (de 10 a 1 VDC). Puesto que el flujo luminoso de las lámparas es constante, las variaciones de iluminancia que se presentan se atribuyen a la no linealidad de la luz natural.

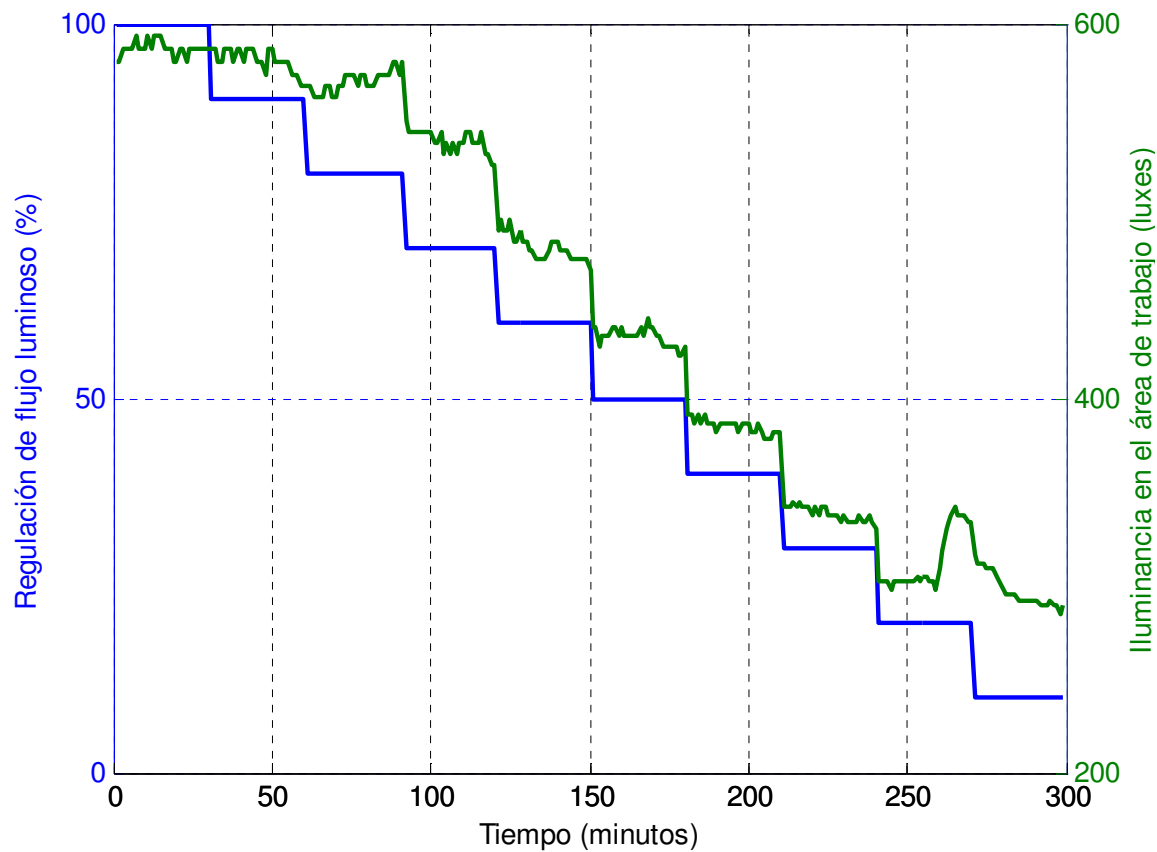


Figura 4. 8. Porcentaje de regulación del flujo luminoso de las lámparas al variar la señal de control de 10 a 1 VCD e iluminancia medida en el área de trabajo.

4.3 Operación del sistema en modo de control automático

Como se vio en la sección anterior la no linealidad de la luz natural hace que el nivel de iluminación en el área de trabajo no sea constante. Este tipo de variaciones se pueden eliminar al hacer uso de un sistema de control automático que regule en tiempo real el flujo luminoso de las lámparas.

Operar el sistema en modo automático permite usar solo la cantidad de luz artificial necesaria para alcanzar y mantener el valor de iluminancia deseado. Siempre y cuando la contribución de la luz del día no sobrepase el valor deseado de iluminancia, o que el máximo flujo luminoso que suministran las luminarias no sea suficiente para alcanzar la referencia.

Para cuantificar la influencia de la luz natural en el desempeño del sistema se instalaron dos nodos esclavos en el área de trabajo: SNLC-S1 en el interior del aula B-9 y SNLC-S2 en el aula B1 (Figura 4.9).

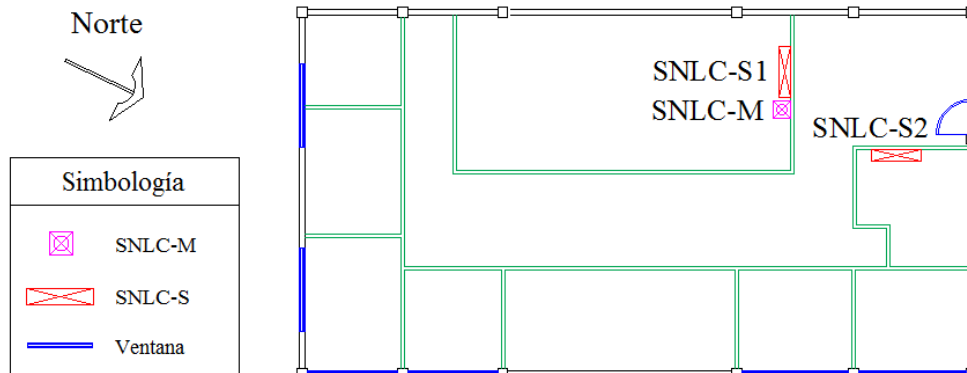


Figura 4. 9. Ubicación de los nodos esclavos y maestro dentro del espacio de trabajo.

Las principales actividades que se llevan a cabo en el área de estudio son lectura y escritura en una PC, para ello en la norma UNE-EN 12464-1 encontramos que para este tipo de actividades educativas el valor de iluminancia

recomendado es 300 luxes. Éste valor es establecido como referencia del controlador difuso mediante el comando ‘establecer SP’ en la GUI del nodo maestro.

4.3.1 Iluminancia en el área de trabajo

Como se ha discutido, la iluminación natural es una fuente dinámica de luz. En la Figura 4.10 se muestra el nivel de iluminación en el plano de trabajo del nodo SNLC-S1 con el controlador difuso activado. Antes del amanecer y después del ocaso las lámparas de éste nodo no son capaces de alcanzar los 300 luxes requeridos, aún cuando el controlador aplica la máxima señal de control al balastro (10 VCD). Sin embargo, a medida que transcurre el día la combinación la luz artificial de las luminarias y la luz natural, permite alcanzar el nivel de iluminación deseado.

Para mantener éste valor, el controlador difuso regula la señal de control analógica aplicada al balastro durante las horas en que la contribución de la luz del día excede el valor de iluminación deseado (de 7:40 a.m. a 7:21 p.m.).

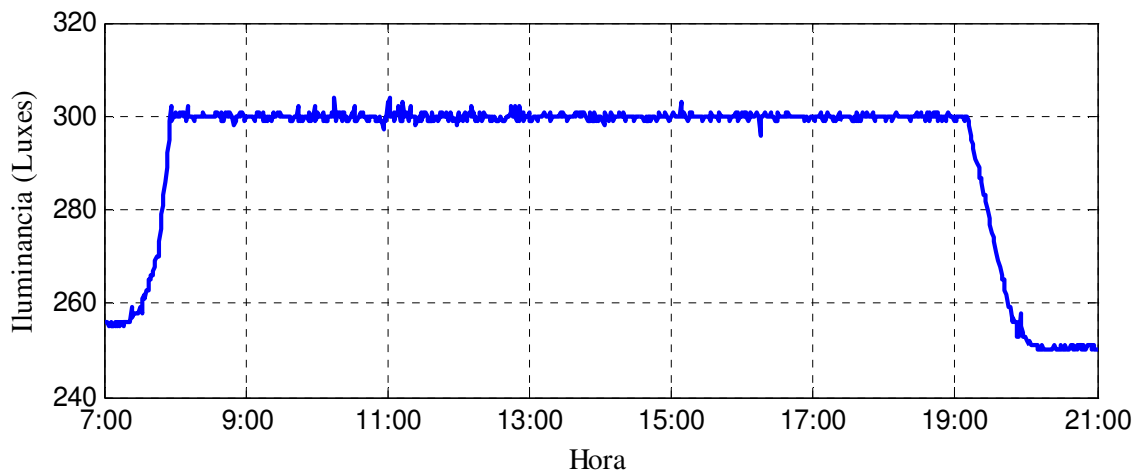


Figura 4. 10. Nivel de iluminancia en el plano de trabajo del SNLC-S1.

La Figura 4.11 muestra el nivel de iluminación del nodo SNLC-S2 ubicado cerca de las ventanas. A diferencia del nodo anterior, en el plano de trabajo del SNLC-S2 la presencia de la iluminación natural es superior a 300 luxes a partir de las 7:58 a.m. y es inferior a éste valor hasta la 1:23 p.m., por lo tanto, sus lámparas permanecen apagadas durante éste intervalo de tiempo. Después de la 1:23 p.m. el controlador difuso enciende las lámparas y comienza a regular la potencia del balastro para mantener el valor de iluminancia en 300 luxes.

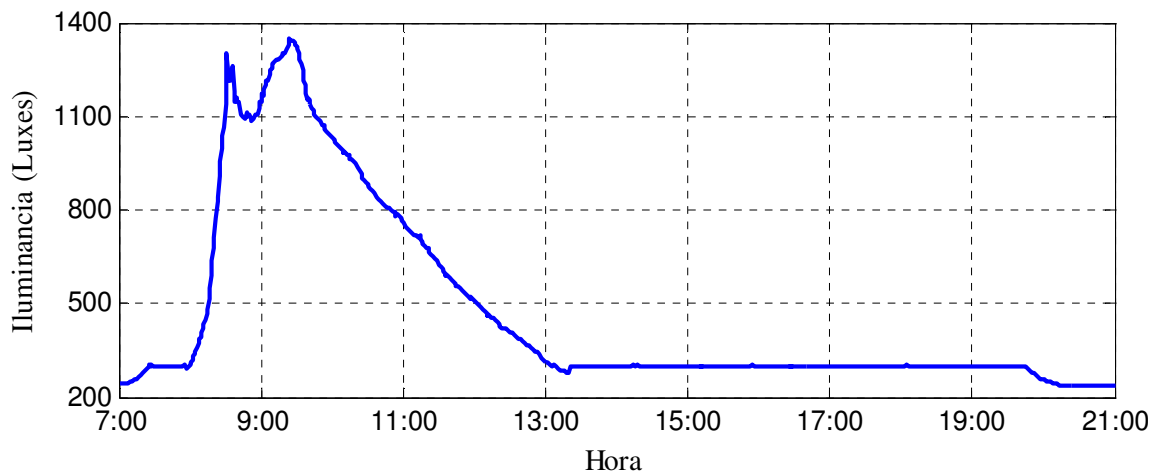


Figura 4. 11. Nivel d eiluminación en el plano de trabajo del SNLC-S2.

4.3.2 Consumo de energía eléctrica

La luz natural en el interior del edificio favorece el ahorro de energía. Ésto se aprecia con mayor facilidad toda vez que no es encesarario encender las luminarias. No obstante, con el uso de balastros electrónicos regulables es posible operar las lámparas por debajo del 100% de su capacidad de flujo luminoso para alcanzar el confort visual de los usuarios en función del nivel de iluminancia en el espacio de trabajo. La Figura 4.12 reporta el consumo de potencias activa y aparente del nodo SNLC-S1.

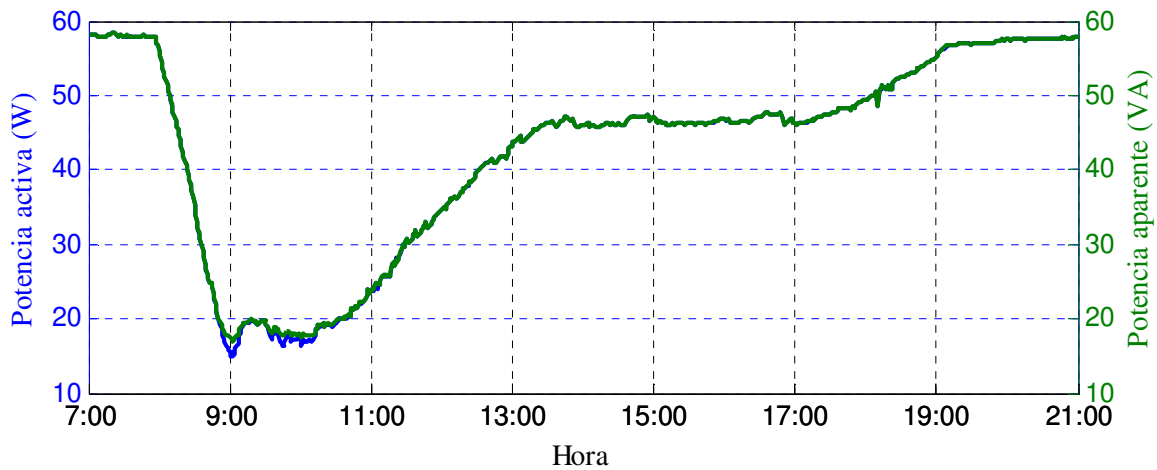


Figura 4. 12. Potencia activa y aparente para SNLC-S1.

Las gráficas de las figuras 4.13 y 4.14 presentan el consumo de corriente y voltaje de línea respectivamente del nodo SNLC-S1. En éstas gráficas se aprecia que el consumo de energía eléctrica desciende a partir de que se alcanzan los 300 luxes en el plano de trabajo (7:40 a.m.). El consumo mínimo se presenta cuando la influencia de la luz del día es mayor (de 9:00 a 10:00 a.m.) y comienza a incrementar justo cuando la aportación de la iluminación natural empieza a decaer, alcanzando nuevamente su máximo valor a las 7:21 p.m.

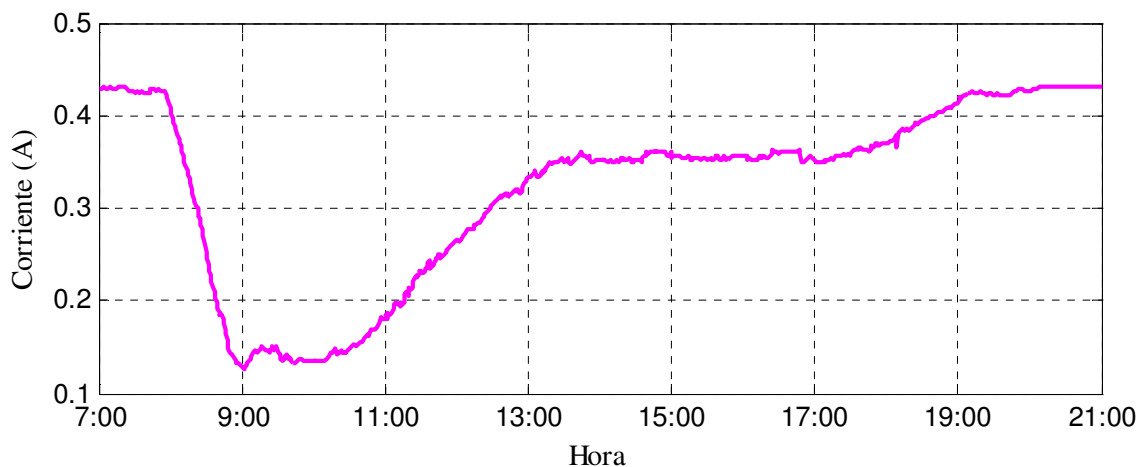


Figura 4. 13. Consumo de corriente del nodo SNLC-S1 operando en modo de control automático.

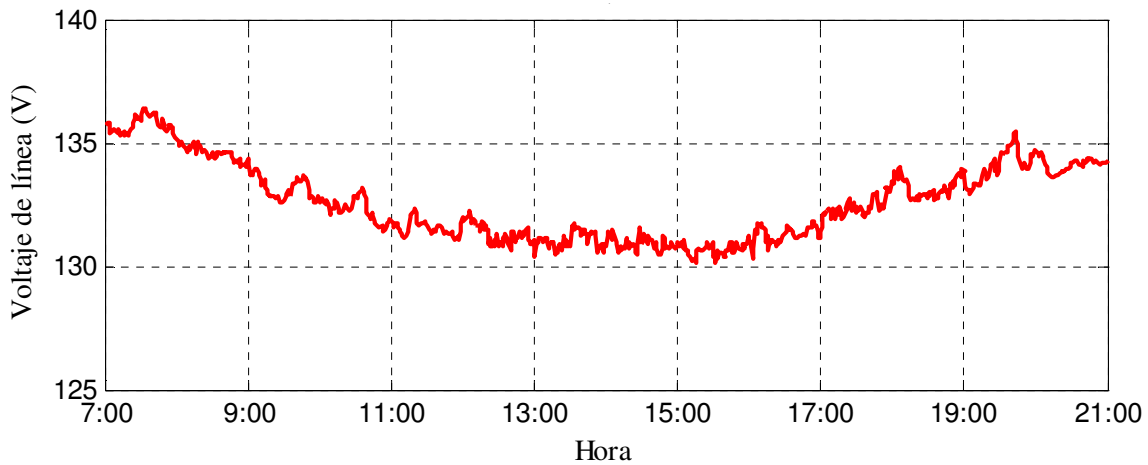


Figura 4. 14. Voltaje de línea del nodo SNLC-S1 al operar en modo de control automático.

Para el nodo SNLC-S2 la Figura 4.15 presenta el consumo de potencias activa y aparente, la Figura 4.16 su consumo de corriente y la Figura 4.17 el voltaje de línea.

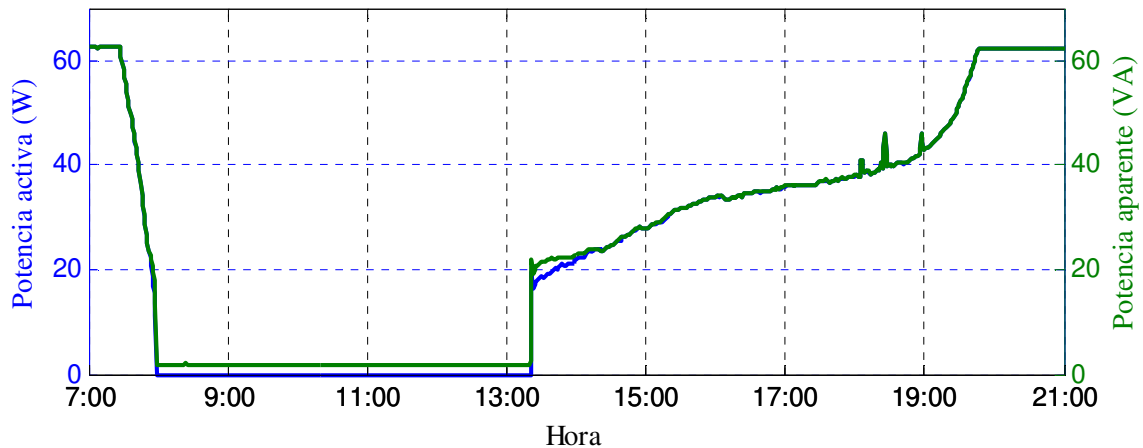


Figura 4. 15. Potencia activa y aparente para SNLC-S2.

Debido a su proximidad a las ventanas, en el nodo SNLC-S2 el nivel de iluminación que se registra de 7:58 a.m. hasta la 1:23 p.m. es superior al valor de iluminancia deseado, por lo tanto, las lámparas de este nodo permanecen apagadas. A partir de la 1:23 p.m. la sola presencia de la luz natural no es

suficiente para alcanzar los 300 luxes deseados, así que el controlador enciende las lámparas y comienza a regular el flujo luminoso a fin de mantener el nivel deseado. Esto último provoca un incremento gradual en el consumo de electricidad del nodo.

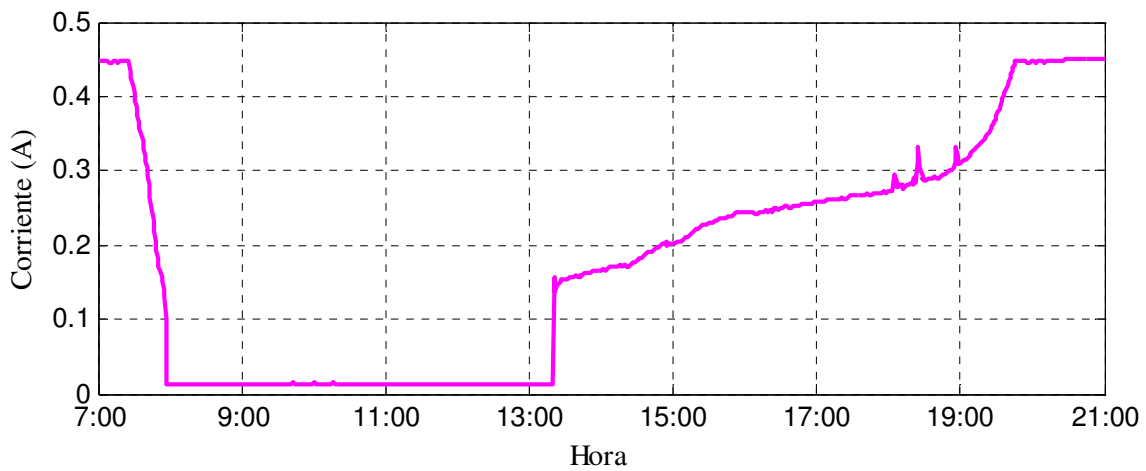


Figura 4. 16. Consumo de corriente del nodo SNLC-S1 operando en modo de control automático.

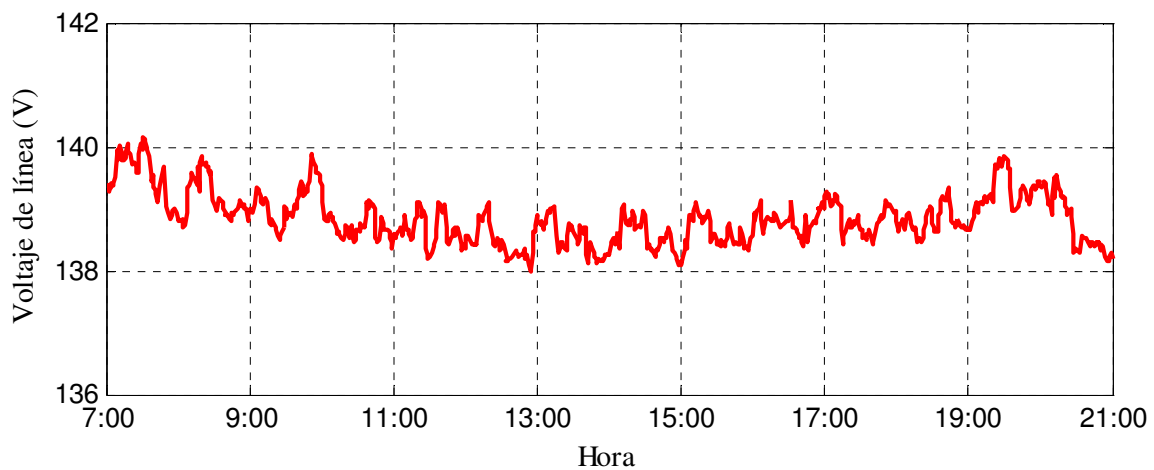


Figura 4. 17. Voltaje de línea del nodo SNLC-S1 al operar en modo de control automático.

Para finalizar, la Figura 14.18 compara por hora el consumo de energía activa de ambos nodos. De los datos registrados se tiene que el consumo total de

energía activa del nodo SNLC-S1 es 483.01 Wh y para el nodo SNLC-S2 234.48 Wh.

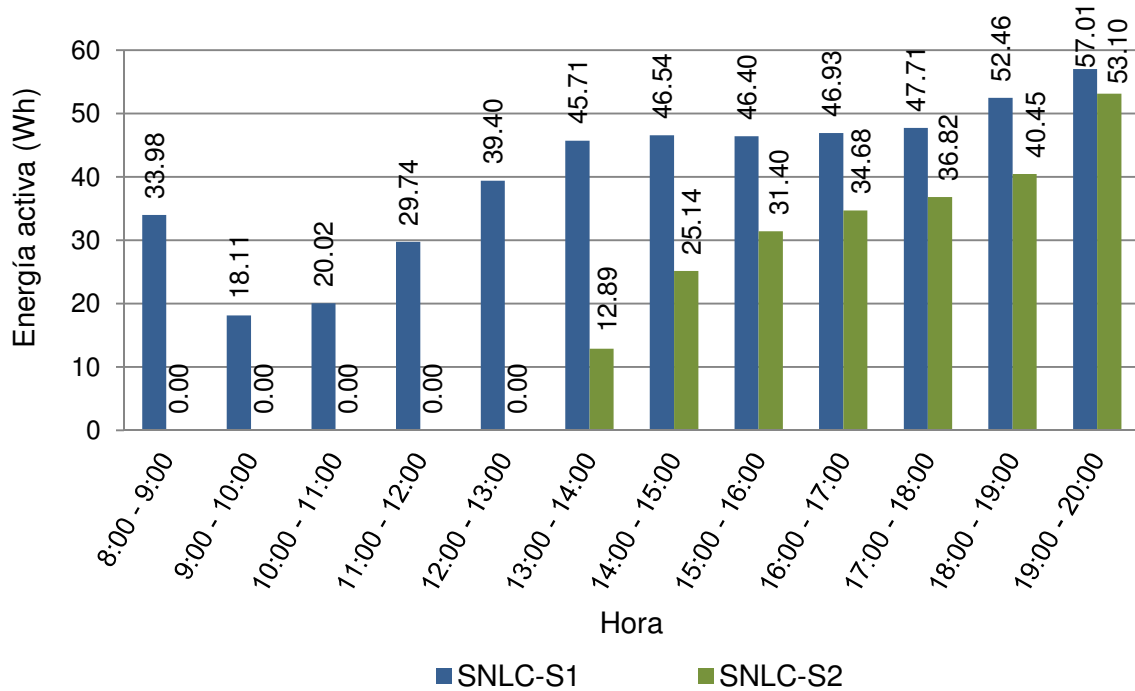


Figura 4. 18. Consumo de energía del sistema operando en modo de control automático y su consumo nominal.

Tomando como referencia el consumo nominal del balastro se estima que para el mismo horario de actividades el consumo de energía activa del sistema cuando se opera a través la instalación convencional (interruptores físicos) es igual a 768 Wh, por lo tanto el ahorro de energía obtenido en el nodo SNLC-S1 es 36.98% y para el nodo SNLC-S2 es 69.47%.

V. CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

Un sistema inteligente de control de iluminación (SICI) basado en el uso de una red de sensores lumínicos y actuadores (balastros electrónicos regulables) permite establecer el nivel de iluminancia que el usuario desea en el espacio de trabajo. Además al emplear un controlador difuso se optimiza el aprovechamiento de la luz natural y se logran ahorros potenciales de energía eléctrica de hasta 69.47%.

La técnica de control difuso resulta apropiada para control de iluminación, ya que este tipo de controladores responde de forma adecuada a los cambios multivariables de la iluminación natural. El tiempo de respuesta para el controlador diseñado en esta investigación es de 3 a 5.4 segundos y éste es capaz de mantener el valor deseado de iluminancia con una exactitud de ± 5 luxes.

Actualmente el adecuado desarrollo de interfaces de hardware y software es crucial para facilitar la integración de una red de sensores en nuevas construcciones o en edificios ya existentes. En nuestra propuesta el hardware de la red ha sido diseñado de tal manera que su incorporación a un sistema de iluminación se realice de manera fácil y rápida. Por su parte, la GUI desarrollada para operar el SICI ofrece dos modos de control: convencional y automático. El modo de control convencional hace una analogía al uso de interruptores físicos y atenuadores de iluminación. El modo de control automático presenta la ventaja de tener un controlador difuso que permite utilizar solo la cantidad de energía eléctrica necesaria para alcanzar el nivel de iluminación que de acuerdo a la norma UNE EN12646-1 brinde confort visual al usuario.

La implementación de un protocolo de comunicación para el intercambio de datos entre los nodos de la red, hace posible la incorporación de un comando

para modificar el valor de referencia del controlador difuso, lo que permite al sistema adaptarse a las necesidades de iluminancia de cualquier espacio de trabajo. Siempre y cuando en su diseño de luminotecnía el sistema de iluminación se haya proyectado para alcanzar el valor deseado.

La aportación que la luz del día tiene en la iluminación interior de un edificio depende de factores como la localización y orientación geográfica, el clima y la estación del año, por mencionar algunos. Sin embargo, la ubicación de la luminaria en el área de trabajo también es importante, ya que en las zonas del edificio lejanas a las ventanas reciben menor contribución de la iluminación natural (alrededor de 270 luxes), mientras que las zonas próximas a las ventanas reciben mayor aportación (950 luxes o más).

En nuestro caso de estudio se instalaron dos nodos esclavos en el edificio de prueba (CEDIT) y se monitoreó su consumo de energía eléctrica durante el horario normal de actividades. El primer nodo (SNLC-S1) se colocó lejos de las ventanas mientras que el segundo (SNLC-S2) se ubicó próximo a las ventanas. Debido a que la influencia de la luz del día es mayor en las zonas cercanas a las ventanas, el ahorro de energía eléctrica para el nodo SNLC-S2 fue de 69.47%, el cual resulta superior al del nodo SNLC-S1 quien registró un ahorro de 36.98%.

El ahorro de energía en un nodo esclavo de la red varía en función de la señal de control aplicada al balastro (10 a 1 VCD). A mayor señal de control, mayor consumo de energía eléctrica y viceversa.

En modo de control convencional se explota la característica que el balastro SLI-8137 tiene de regular la potencia que se aplica a las luminarias. Ésta característica permite un máximo ahorro de 77.45% en el consumo de energía eléctrica y sucede cuando el balastro se regula con una señal de control igual a

1VCD. El consumo de energía activa para ésta señal es de 6.59 Wh, esto es 10.3% de su consumo nominal.

Por último el SICI propuesto no solo ofrece la reducción de costos operativos y el confort visual de los usuarios, sino también favorece el cuidado ambiental, ya que a medida que el consumo de electricidad es menor la demanda energética en las plantas generadoras disminuye, y con ello la quema de combustibles fósiles empleados durante la producción de electricidad.

Como parte del trabajo futuro de esta investigación, se propone el desarrollo de la portabilidad del sistema, es decir, hacer que los componentes sean de fácil instalación y operación; para ellos se contempla el mejoramiento de la interfaz gráfica de usuario a fin de competir con los sistemas comerciales de control de iluminación. De igual forma se contempla la posibilidad de expandir el tamaño de la red del SICI diseñado, la cual ha sido establecida para un máximo de 64 unidades esclavas, no obstante, debido a la capacidad de una red inalámbrica Zigbee, teóricamente ésta puede expandirse a 65 536 módulos, aumentando la capacidad y la competitividad del sistema.

LITERATURA CITADA

- Attard N., Camilleri S., Drago R., Hili M., Casha O., Gatt E., Grench I. 2010. VHDL implementation of a DMX512 decoder on a FPGA. International Conference on Electronics, Circuits, and Systems 17th IEEE (2010), pp. 710-713.
- Bergmann, A.; Hanley, N. y Wright, R. 2006. Valuing the attributes of renewable energy investments. *Energy Policy*, 34 (2006), pp. 1004–1014.
- Bommel W.J.M, 2006. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. *Applied Ergonomics* 37 (2006), pp. 461–466.
- Bujdei C., Moraru S.A., 2011. Ensuring comfort in office buildings Designing a KNX monitoring and control system. IEEE 7th International Conference on Intelligent Environments, pp. 222-229.
- Camargo, E. 2009. Balastro Electrónico Basado en la Técnica de Conformación de Corriente. Instituto Tecnológico de Celaya, tesis de maestría, 2006.
- Cao X., Chen J., Gao C., Sun Y., 2009. An optimal control method for applications using wireless sensor/actuator networks. *Computers and Electrical Engineering* 35 (5) 748–756.
- CFE. 2011. Comisión Federal de Electricidad / Estadísticas. <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/estadisticas/Paginas/Clientes.aspx>.
- Chapa, J. 2004. Manual de las instalaciones de alumbrado y fotometría. Editorial Limusa, México D.F., 2004. 226 páginas.
- Cheung H.D., Chung T.M., 2008. A study on subjective preference to daylight residential indoor environment using conjoint analysis. *Bulding and Environment* 43 (12) 2101-2111.
- Choi, S. H.; Kim, B. K.; Park, J.; Kang C. H. y Eom, D. S. 2004. An implementation of wireless sensor network for Security System using Bluetooth. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, pp. 236 – 244.
- Chi, T.; Chen, M. y Gao, Q. 2008. Implementation and Study of a Greenhouse Environment Surveillance System Based on Wireless Sensor Network. International Conference on Embedded Software and Systems Symposia, 2008. ICESS Symposia '08., pp. 287 – 291.

- Contenti Cecilia. 2002. Digitally Addressable DALI Dimming Ballast. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE. Pp 936-942.
- Cziker, A.; Chindris, M. y Miron, A. 2007. Implementation on Fuzzy Logic in Daylighting Control. 11th International Conference on Intelligent Engineering System, 2007. INES 2007. Pp. 195-200.
- Cziker, A.; Chindris, M. y Miron, A. 2008. Fuzzy Controller for a Shaded Daylighting System. 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. Pp. 203-208.
- DALi Manual, DALI AG of ZVEI, Division Luminaries, 2001.
- Dounis, A.I. y Caraiscos, C. 2008. Advanced control systems engineering for energy and confort management in a building environment-A review. Renewable and Sustainable Reviews 13 (2009), pp.1246-1261.
- Dounis A.I., Tiropanis P., Argiriou A., Diamantis A., 2011. Intelligent control system for reconciliation of the energy savings with confort in buildings using soft computing techniques. Energy and Buildings. 43 (1) 66–74.
- Gajbhiye, P. y Mahajan, A. 2008. A survey of architecture and node deployment in Wireless Sensor Network. First International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies, 2008. ICADIWT 2008.. pp. 426 – 430.
- Hu J., Olbina S., 2011. Illuminance-based slat angle selection model for automated control of split blinds. Building and Environment. 46 (3) 786-796.
- Huang, Y.; Wu, L. y Zhu, J. 2010. Research of Fuzzy Control System about Greenhouse Supplement Light Lamps Based on Single-chip Microcomputer. Proceedings of the 8th World Congress in Intelligent Control and Automation, pp. 3751 - 3754.
- Hurtado, J.L. y Rodríguez E. 2006. Control de iluminación con Bus CAN. Instituto Tecnológico de Celaya, tesis de maestría, 2006.
- IEA. 2009b. Key world energy statistic 2009. International Energy Agency. 9 rue de la Federation, 75739 Paris Cedex 15, France.
- Jang W.S., Healy W.M., 2009. Wireless sensor network performance metrics for building applications. Energy and Buildings 42 (6) 862-868.
- Jenkins D., Newborough M., 2007. An approach for estimating the carbon emissions associated with office lighting with a daylight contribution. Applied Energy 84(6) 608-622.

- KNX Association International (2012). www.knx.org. Fecha de consulta: Enero de 2012.
- Kolokotsa D. 2003. Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment. *Building and Environment*. Vol. 38. Pp. 1439-1450.
- Kolokotsa D., Saridakis G., Pouliezios A., Stavrakakis G.S., 2006. Design and installation of an advanced EIB™ fuzzy indoor comfort controller using Matlab™. *Energy and Buildings* 38 (9) 1084-1092.
- Lah M.T., Zupancic B., Peternelj J., Krainer A., 2006. Daylight illuminance control with fuzzy logic. *Solar Energy* 80 (3) 307-321.
- Leephakpreeda T. 2004. Adaptive Occupancy-based Lighting control via Grey Prediction. *Building and Environment* 40 (2005), pp. 881-886.
- Li D., Lam T., Wong S., 2006. Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls. *Energy Conversion and Management* 47(9-10) 1133-1145.
- Li, H.; Wu, M. y Zhong Y. 2008. Development and Research of lighting System Based on DALI. 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008, pp. 1302 – 1307.
- LONMark International (2012). www.lonmark.org. Fecha de consulta: Enero de 2012.
- Lun-Wu Yeh, Che-Yen Lu, Chi-Wai Kou, Yu-Chee Tseng, Chih-Wei Yi., 2010. Autonomous Light Control by Wireless Sensor and Actuator Networks. *IEEE Sensors Journal*, 10 (6) 1029-1041.
- Luna-Rubio, R.; Herrera-Ruiz, G.; Trejo-Perea, M.; Vargas-Vázquez, D. y Ríos-Moreno, G.J. 2009. Lighting Automatic Control System for Intelligent Buildings. *International Review of Automatic Control (I.RE.A.CO.)*, Vol. xx, n. x.
- Luna-Rubio R., Trejo-Perea M., Vargas Vázquez D., 2012. Optimal Sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy* 86 (4) 1077-1088.
- Ma, Y. y Wobschall, D. 2007. A Sensor Network for Buildings Based in the DALI Bus. *IEEE Sensors Applications Symposium, 2007. SAS '07*, pp. 1-3.
- Mansy, K. 2004. A user-friendly procedure to visualize the hourly quantitative performance of daylighting systems. *Solar Energy* , 77, pp. 373-380.
- Muller-Furstenberger, G. y Wagner, M. 2007. Exploring the environmental Kuznets hypothesis: theoretical and economical problems. *Ecological Economics* , 62 (2007), pp. 648-660.

- Nakamura M., Sakurai A., Furubo S., Ban H., 2008. Collaborative processing in Mote-based sensor/actuator networks for environment control application. *Signal Processing* 88 (7) 1827–1838.
- National Instruments, 2009. LabView, PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual.
- Noriega, A. 2010. Lógica Difusa. Apuntes Control Inteligente. Universidad Autónoma de Querétaro, Maestría en Instrumentación y Control Automático, pp. 1 - 24.
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 12 (9), 2265 - 2300.
- Osram. 2006. High Accuracy Ambient Light Sensor SFH 5711 Application Note. Pp. 1-9.
- Painter B., Brown N., Cook M. J., 2012. Practical application of a sensor overlay system for building monitoring and commissioning. *Energy and Buildings*. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.003 48.
- Pan, M.S.; Yeh, L.W.; Chen, Y.A.; Lin, Y.H. y Tseng, Y.C. 2008. Design and Implementation of a WSN-Based Intelligent Light Control System. ICDCS '08. 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops.
- Paris B., Eynard J., Grieu S., Polit M., 2011. Hybrid PID-fuzzy control scheme for managing energy resources in buildings. *Applied Soft Computing* 11 (8) 5068–5080.
- PEP. 2009. Las reservas de hidrocarburos de México 2009. Pemex Exploración y Producción. Secretaría de Energía.
- PND. 2011. Plan Estatal de Desarrollo 2007-2012. <http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/index.php?page=documentos-pdf>.
- Samundiswary, P.; Priyadarshini, P. y Dananjayan, P. 2009. Performance Evaluation of Heterogeneous Sensor Networks. International Conference on Future Computer and Communication, 2009. ICFCC 2009, pp. 264 – 267.
- Shi, L. y Chen, Y. 2007. The Design Study of Fuzzy Controller. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2007. Vol. 20, no. 6, pp. 108 – 110.
- Trobec, L.M.; Zupancic, B.; Peternelj, J. y Krainer, A. 2006. Daylight illuminance control with fuzzy logic. *Solar Energy* 80, pp. 307-321.
- USITT DMX512-A. 2004. Entertainment Technology — USITT DMX512–A — Asynchronous Serial Digital Data Transmission Standard for Controlling Lighting Equipment and Accessories".

- Wang, G.J., Gu, S. y Wang, Z.X. 2009. The design of fuzzy control system for power saving lighting on MATLAB. IEEE Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp. 455 - 458.
- Wang, Y. y Wang, Z. 2010. Design of intelligent residential lighting control system based on ZigBee wireless sensor network and fuzzy controller. IEEE International Conference on Machine Vision and Human-machine Interface, pp. 561-564.
- Webb, A. 2006. Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light. *Energy and Buildings* 38 (2006), pp. 721–727.
- Wen Yao-Jung, Agogino Alice M., 2011. Personalized dynamic design of networked lighting for energy-efficiency in open-plan office. *Energy and Buildings* 43 (8) 1919–1924.
- Wen-Tsai Sung, Yao-Chi Hsu, 2011. Designing an industrial real-time measurement and monitoring system based on embedded system and ZigBee. *Expert Systems with Applications* 38 (4) 4522–4529.
- Winterbottom, M. y Wilkins, A. 2009. Lighting and discomfort in the classroom. *Journal of Environmental Psychology* 29 (2009), pp. 63–75.
- Wong J.K.W., Li H., Wang S. W., 2005. Intelligent building research: a review. *Automation in Construction* 14 (1) 143–159.
- Wong, J. y Li, H. 2006. Development of a conceptual model for the selection of intelligent building systems. *Building and Environment* 41, pp. 1106–1123.
- Wu, W.; Wu, M. y Liu, Y. 2006. A Design of Embedded DALI Controller. IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. 1237 - 1240.
- Yang, I.H., y Nam, E.J. 2010. Economic analysis of the daylight-linked lighting control system in office buildings. *Solar Energy* 84, pp. 1513-1525.
- Yoowattana S., Nantajiwakornchai C., Sangworasil M. A Design of Embedded DMX512 Controller using FPGA and XILKernel. Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2009), pp. 73-77.
- Zhang, Y.; Zhou, P. y Wu, M. 2006. Research on DALI and Development of Master-Slave module. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 1106 – 1110.
- Zhong, Y.; Li, H., y Wu, M. 2009. Research of Feedback Control of Lighting system Based on DALI. 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2009. INDIN 2009, pp. 396 - 401.

APÉNDICES

A.1. Listado de algoritmos programados en el microcontrolador para el SICI desarrollado

```
#include <18f4550.h>
#device adc=10 // resolucion del ADC
#fuses HS,MCLR, PLL5, CPUDIV1, NOWDT, NOLVP, NOCPD, NODEBUG, NOBROWNOUT
#use delay(clock=2000000) // valor del reloj considerando los fusibles activos
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8) //configuracion de la comunicacion serial
#include <stdlib.h> // libreria para manejo de cadenas
#include <math.h> //libreria para funciones matematicas ya definidas
#use fast_io(D)
//
// _____
//          DECLARACION DE VARIABLES
// _____

//*****
//          VARIABLES PARA LECTURA DEL BUFFER

int1 RX=0; // bandera para recibir datos
char dat; // guarda el caracter leído del buffer
int8 count=0; // cuenta los datos leídos en el buffer hasta detectar caracter final
int8 sof=0; // bandera para activar la lectura del buffer

//*****
//          VARIABLES PARA OBTENER LOS DATOS DEL BUFFER (direccion y comandos)

int8 add_PIC; // lectura del puerto D del PIC
int8 adH_PIC; // Direccion Alta leída del PIC
int8 adL_PIC; // Direccion Baja leída del PIC
int8 buffer[5]= {0, 0, 0, 0, 0}; // trama recibida
int8 add_buf; // Direccion leída del buffer (byte 2)
int8 adH_buf; // Direccion Alta leída del buffer
int8 adL_buf; // Direccion Baja leída del buffer
int16 comH_buffer; // Byte de comando leído del buffer (byte 3)
int8 comL_buffer; // Byte de comando leído del buffer (byte 4)
int8 com_buf; // Comando leído del buffer
int16 val_buf; // Valor del comando leído del buffer
int16 valH_buf; // parte alta del valor leído en el byte de comando (byte 3)
//*****
//          VARIABLES PARA OBTENER LOS DATOS DEL BUFFER (direccion y comandos)

//int8 add_PIC; // byte direccion en la trama de respuesta
int16 value_resp; // bytes de valor de respuesta
int8 vhigh_resp; // byte valor alto en la trama de respuesta
int8 vlow_resp; // byte valor bajo en la trama de respuesta
```

```

char array_resp[5]; // arreglo para enviar trama de respuesta

//*****
//          VARIABLES DE COMANDOS PREDEFINIDOS

int8 AC = 0; // comando 'Control Automático'
int8 CC = 1; // comando 'Control Convencional'
int8 SPS = 2; // comando 'Cambiar SP a esclavo'
int8 OOS = 3; // comando 'ON/OFF esclavo'
int8 LLS = 4; // comando 'solicitar nivel de iluminacion del esclavo'
int8 STS = 5; // comando 'Solicitar estado (On/Off) del esclavo'
int8 GSP = 6; // comando 'Solicitar SP del esclavo'
int8 SLS = 7; // comando 'Establecer Escena de Iluminación a esclavo'
int1 flagAC = 0; // control automatico desactivado
int1 flagAgain = 0; // bandera para echar a andar nuevamente el controlador difuso

//***** CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES DE MEMBRESIA *****
//          { NH } { NL } { ZE } { PL } { PH }
signed int16 LimE[5][4] = {{-600,-500,-200,-100},{-200,-100,0, 0}, {-100,0,100, 0},{0,100,200,
0},{100,200,500,600}};
signed int8 LimD[5][4] = {{-600,-500,-200,-100},{-200,-100,0, 0}, {-100,0,100, 0},{0,100,200,
0},{100,200,500,600}};
signed int8 LimV[5][4] = {{-5,-5,-2,-1},{-2,-1, 0, 0},{-1, 0, 1, 0},{ 0, 1, 2, 0},{ 1, 2, 5, 5}};

float uE[5] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0}; // {uENH, uENL, uEZE, uEPL, uEPH} //DOUBLE O FLOAT????? QUE DIF
HAY? VER MANUAL COMPILADOR
float uD[5] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0}; // {uDNH, uDNL, uDZE, uDPL, uDPH}
float uV[5] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0}; // {uVDF, uVDL, uVNC, uVIL, uVIF}
float wV[5] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0}; // {wDF, wDL, wNC, wIL, wIF }

//*****
//          VARIABLES PARA LECTURA DEL SENSOR

int1 read_SENSOR = 0; // bandera para activar lectura del adc cada 2.5ms
float Vadc; // entrada analógica
int16 Lsensor; // valor en luxes del valor leído del adc

int1 stateSlave = 1; // valor del Pin A1 para monitorear el edo de la lampara (ON/OFF)
int16 SP = 500; // Set Point deseado

//*****
//          VARIABLES DEL ALGORITMO DIFUSO

int8 i = 0; // variable auxiliar para conteo
int16 j = 0; // variable auxiliar para conteo
int16 sumLX = 0.0; // inicializa la suma de luxes para calcular promedio
int8 contMTRAS = 0; // inicializa el contador de muestras del ADC p/luxes
int16 lx = 0; // luxes medidos
float Err = 0.0; // entrada Error
float dE = 0.0; // entrada Pendiente del Error
float Ek_1 = 0.0; // Error pasado

float mini = 0.0; // mínimo de uE, uD

```

```

float num = 0.0; // numerador de la defusificacion
float den = 0.0; // denominador de la defusificacion
float Vf = 0.0; // salida del algoritmo difuso
float VCD = 10.0; // voltaje de salida del controlador (0-10 V)
float Vout = 0.0; // voltaje de salida flotante para PWM (0-5 V)
int16 VoutPWM = 1000; // valor de la salida PWM (0-1023)
int16 cont0 = 0; // cuenta 0's en la salida PWM para desp de 1 min apagarla

//_____
//          INTERRUPTOS
//_____

#int_RDA      // INTERRUPTO DEL PUERTO SERIE
void Serial_isr(void)
{
  dat = getc(); // dat guarda el caracter recibido en el buffer
  if( dat==0x4F)
  {
    sof = 1; // bandera activa para guardar los sig datos del buffer
    count = 0; // inicia contador para recorrer arreglo
  }
  if(sof)
  {
    buffer[count] = dat;
    count++;
  }
  if( dat==0x7E )
  {
    sof = 0;
    RX = 1;
  }
}

#int_TIMER1 // INTERRUPTO TIMER-1 PARA LECTURA ADC-0
void TIMER1_isr(void)
{
  read_SENSOR = 1;
  set_timer1(26473); // interrupcion generada para tomar una muestra
}

//_____
//          DECLARACION DE FUNCIONES
//_____

//*****
//          FUNCION PARA CONFIGURACION DEL uC

void configPIC(void){
  setup_adc_ports(AN0|VSS_VDD); // habilita puerto ADC0 para leer sensor
  setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
  setup_timer_1(T1_INTERNAL|TO_DIV_1); // configura timer1 para interrupción interna
  set_timer1(26473); // inicializa para contar 7.8125 mseg
  enable_interrupts(INT_TIMER1); // habilita interrupcion interna x timer1

```

```

enable_interrupts(INT_RDA); // habilita interrupción para rs-232
enable_interrupts(GLOBAL); // habilita interrupciones globales
setup_ccp1(CCP_PWM); // habilita salida PWM1
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,249,1); // en la conf del timer2, el postScaler debe valer 1
set_tris_d(0xFF); // establece el puerto como entrada para la dirección
output_high(PIN_A1); // al energizar el sistema la lampara enciende
set_pwm1_duty(1000); // a su máximo valor 10vcd
}

//*****
// FUNCION PARA LECTURA DEL SENSOR

float readADC(void){
    set_adc_channel (0);
    Vadc = (read_adc()*5.0/1024.0);
    return pow(10.0,(Vadc/(100000*0.000010)) ); // Luxes = [10^(Vadc/R*10u)]
}

//*****
// FUNCIONES PARA CONTROL DIFUSO

//----- INICIALIZA VARIABLES -----
void iniciaVar(void){
    mini= 0.0;
    num = 0.0;
    den = 0.0;
    Vf = 0.0;
    for (i=0; i<=4; i++){
        uE[i] = 0.0;
        uD[i] = 0.0;
        uV[i] = 0.0;
        wV[i] = 0.0;
    }
}

//----- FUSIFICADOR TRIANGULAR -----
float fusifica(float X, float a, float b, float c){
    if ( (X>a) && (X<b) ){
        return (X-a)/(b-a);
    }else if ( (X>=b) && (X<=c) ){
        return (c-X)/(c-b);
    }else{
        return 0;
    }
}

//----- FUSIFICADOR TRAPEZOIDAL -----
float fusificaTP(float X, float a, float b, float c, float d){
    if ( (X>a) && (X<b) ){
        return (X-a)/(b-a);
    } else if ( (X>=b) && (X<=c) ){
        return 1;
    } else if ( (X>c)&&(X<d) ){
        return (d-X)/(d-c);
    } else{

```

```

    return 0;
}
}
//----- FUSIFICACION -----
void fusificacion(float Err, float dE){
    for (i=0; i<=4; i++){
        if ( (i==0) || (i==4) ){
            if ( (Err > LimE[i][0]) && (Err < LimE[i][3]) ){
                uE[i] = fusificaTp(Err, LimE[i][0], LimE[i][1], LimE[i][2], LimE[i][3]);
            }
            if ( (dE > LimD[i][0]) && (dE < LimD[i][3]) ){
                uD[i] = fusificaTp(dE, LimD[i][0], LimD[i][1], LimD[i][2], LimD[i][3]);
            }
        }
        else if ( (i>=1)&&(i<=3) ){
            if ( (Err > LimE[i][0]) && (Err < LimE[i][2]) ){
                uE[i] = fusifica(Err, LimE[i][0], LimE[i][1], LimE[i][2]);
            }
            if ( (dE > LimD[i][0]) && (dE < LimD[i][2]) ){
                uD[i] = fusifica(dE, LimD[i][0], LimD[i][1], LimD[i][2]);
            }
        }
    }
}
//----- FUNCIONES MINIMO Y MAXIMO -----
float minimo(float E, float dE){
    if (E < dE){
        return E;
    } else{
        return dE; }
}

float maximo(float x, float y){
    if (x > y){
        return x;
    } else{
        return y; }
}
//----- BASE DE REGLAS -----
void baseDeReglas(float uE[], float uD[] ){
    for (i=0; i<=4; i++){
        if (uE[i] > 0){
            for (j=0; j<=4; j++){
                if (uD[j] > 0){
                    mini = minimo(uE[i], uD[j]);
                    if (i==0){ // reglas 1-5
                        if (j==0){ uV[0] = maximo(uV[0], mini); }
                        if (j==1){ uV[0] = maximo(uV[0], mini); }
                        if (j==2){ uV[1] = maximo(uV[1], mini); }
                        if (j==3){ uV[1] = maximo(uV[1], mini); }
                        if (j==4){ uV[2] = maximo(uV[2], mini); }
                    }
                    if (i==1){ // reglas 6-10
                        if (j==0){ uV[0] = maximo(uV[0], mini); }

```

```

    if (j==1){ uV[1] = maximo(uV[1], mini); }
    if (j==2){ uV[1] = maximo(uV[1], mini); }
    if (j==3){ uV[2] = maximo(uV[2], mini); }
    if (j==4){ uV[3] = maximo(uV[3], mini); }
}
if (i==2){ // reglas 11-15
    if (j==0){ uV[1] = maximo(uV[1], mini); }
    if (j==1){ uV[1] = maximo(uV[1], mini); }
    if (j==2){ uV[2] = maximo(uV[2], mini); }
    if (j==3){ uV[3] = maximo(uV[3], mini); }
    if (j==4){ uV[3] = maximo(uV[3], mini); }
}
if (i==3){ // reglas 16-20
    if (j==0){ uV[1] = maximo(uV[1], mini); }
    if (j==1){ uV[2] = maximo(uV[2], mini); }
    if (j==2){ uV[3] = maximo(uV[3], mini); }
    if (j==3){ uV[3] = maximo(uV[3], mini); }
    if (j==4){ uV[4] = maximo(uV[4], mini); }
}
if (i==4){ // reglas 21-25
    if (j==0){ uV[2] = maximo(uV[2], mini); }
    if (j==1){ uV[3] = maximo(uV[3], mini); }
    if (j==2){ uV[3] = maximo(uV[3], mini); }
    if (j==3){ uV[4] = maximo(uV[4], mini); }
    if (j==4){ uV[4] = maximo(uV[4], mini); }
}
}
}
}
}
}
//----- DEFUSIFICADOR TRIANGULAR -----
float defusiTg(float uV, float a, float b, float c){
    return c - ( c - a )/2;
}
//----- DEFUSIFICADOR TRAPEZOIDAL -----
float defusiTp(int8 i, float uV, float a, float b, float c, float d){
    float bT = 0.0;
    float bR = 0.0;
    float AT = 0.0;
    float AR = 0.0;
    float mAR = 0.0;
    float mAT = 0.0;
    if (i==0){
        bT = uV * ( d - c );
        AT = bT * uV /2;
        mAT = d - ( bT*2/3 );
        bR = d - ( b + bT );
        AR = bR * uV;
        mAR = b + ( bR/2 );
    } else if(i==4){
        bT = uV * ( b - a );
        AT = bT * uV /2;
    }
}

```

```

    mAT = a + (bT*2/3);
    bR = c - (a + bT);
    AR = bR * uV;
    mAR = c - (bR/2);
}
return (AT*mAT + AR*mAR)/(AT + AR); //return w;
}
//----- DEFUSIFICACION -----
float defusificacion(float uV[]){
    for (i=0; i<=4; i++){
        if (uV[i] > 0) {
            if ( (i >= 1) && (i <= 3) ){
                wV[i] = defusiTg(uV[i], LimV[i][0], LimV[i][1], LimV[i][2]);
            }
            else { //if ((i==0) || (i==4)){
                wV[i] = defusiTp(i, uV[i], LimV[i][0], LimV[i][1], LimV[i][2], LimV[i][3]);
            }
        }
        num = num + wV[i]*uV[i];
        den = den + uV[i] ;
    }
    return num/den;
}
//----- CALCULA ERROR -----
float calculaE(int16 SP, float lx){
    Err = SP - lx;
    if (Err < LimE[0][1]){ Err = LimE[0][1]; } // Limita la entrada Error
    if (Err > LimE[4][2]){ Err = LimE[4][2]; }
    return Err;
}
//----- CALCULA DERIVADA DEL ERROR -----
float calculaDE(float Err, float Ek_1){
    dE = Err - Ek_1; // calcula la pendiente
    if (dE < LimD[0][1]) { dE = LimD[0][1]; } // Limita la entrada Pendiente
    if (dE > LimD[4][2]) { dE = LimD[4][2]; }
    return dE;
}

//----- LEE DIRECCION DE GRUPO E INDIVIDUAL -----
float leeDireccion(float Err, float Ek_1){
    dE = Err - Ek_1; // calcula la pendiente
    if (dE < LimD[0][1]) { dE = LimD[0][1]; } // Limita la entrada Pendiente
    if (dE > LimD[4][2]) { dE = LimD[4][2]; }
    return dE;
}

//-----
// INICIA PROGRAMA PRINCIPAL
//-----

void main(){
    configPIC();
    //=====

```

```

//          LECTURA DE LA DIRECCION --> PUERTO 'D'
//=====
add_PIC = input_d(); // lee el puerto D para byte de dirección
adL_PIC = add_PIC & 0x0f; // toma la parte baja (esclavo) del byte de dirección
adH_PIC = add_PIC >> 4; // hace corrimiento del byte de dirección para tomar el grupo

while(TRUE)
{
    output_high(PIN_A2); // indicador de conexion del PIC

    //=====
    //          SEPARACION DE LA INFORMACION RECIBIDA
    //=====
    if (RX==1)
    {
        add_buffer = buffer[1];
        comH_buffer = buffer[2];
        comL_buffer = buffer[3];
        adH_buf = add_buffer >> 4; // Direccion Alta recibida, direccion de grupo
        adL_buf = add_buffer & 0x0f; // Direccion Baja recibida, direccion de esclavo
        com_buf = comH_buffer >> 4; // Comando recibido
        valH_buf = comH_buffer & 0x0f; // toma los 4 LSB del byte de comando para la parte alta del valor
        val_buf = (valH_buf << 8) | comL_buffer; // Valor del comando recibido

        //=====
        //          EVALUACION Y EJECUCION DE LOS COMANDOS RECIBIDOS EN EL BUFFER
        //=====

        if ( (adH_buf == adH_PIC)&&(adL_buf == adL_PIC) ) // inicia la interpretación del protocolo de
comunicacion
        {
            //*****
            //          IDENTIFICA EL MODO DE OPERACIÓN: CONVENCIONAL O AUTOMATICO      *
            //*****
            if (com_buf == AC) // SI CMD = 'Control Automático'
            {
                flagAC = 1; // activa bandera para ejecucion del controlador difuso
                value_resp = 2;
            }
            if (com_buf == CC) // SI CMD = 'Control Convencional'
            {
                flagAC = 0; // desactiva bandera para ejecucion del controlador difuso
                value_resp = 3;
                set_pwm1_duty(1000);
                output_high(PIN_A1);
            }

            //-----
            //          si AC esta activado interpreta los comandos para este modo
            //-----
            if (flagAC == 1)
            {
                if (com_buf == SPS) // SI COMANDO = 'Cambiar SP de Esclavo'

```



```

{
  SP = val_buf;
  value_resp = 4;
}

if (com_buf == STS) // SI COMANDO = 'Estado del esclavo'
{
  value_resp = stateSlave;
}

if (com_buf == GSP) // SI COMANDO = 'Consultar SP del esclavo'
{
  value_resp = SP;
}

} // fin de interpretacion de comandos para modo AC

//-----
// si CC esta activado interpreta los comandos para este modo
//-----

if (flagAC == 0)
{
  if (com_buf == OOS) // SI COMANDO = 'On/Off Esclavo'
  {
    if (val_buf == 1) // SI VALOR = '1' enciende lampara
    {
      set_pwm1_duty(1000);
      output_high(PIN_A1);
      stateSlave = 1;
    }
    if (val_buf == 0) // SI VALOR = '0' apaga lampara
    {
      output_low(PIN_A1);
      stateSlave = 0;
    }
  }

  value_resp = stateSlave;
}

if (com_buf == SLS) // SI COMANDO = 'Establecer Escena de Iluminacion'
{
  set_pwm1_duty(val_buf);
  value_resp = 5;
}
}

//-----
// En ambos modos se puede consultar el nivel de iluminaci3n
//-----
if (com_buf == LLS) // SI COMANDO = 'Nivel de iluminacion de Esclavo'
{

```

```

    value_resp = lx;
}

vhigh_resp = value_resp >> 8;
vlow_resp = value_resp & 0xFF;
sprintf(array_resp, "%u%u%u%u%u", 0x4E, add_PIC, vhigh_resp, vlow_resp, 0x4E);

//-----
} // termina la interpretacion del protocolo de comunicacion
} // fin del RX

//=====
//          El sensor siempre está leyendo
//=====
if (read_SENSOR == 1) // read_SENSOR se activa con la interrupcion de TMR1
{
    read_SENSOR = 0;
    Lsensor = (int16)readADC();
    sumLX = sumLX + Lsensor;
    contMTRAS++;

    if (contMTRAS >= 32) // 32 mtras/sal del controlador, 4 salidas/seg
    {
        lx = (int16)(sumLX/contMTRAS);
        sumLX = 0;
        contMTRAS = 0;

        //=====
        //    SI Control Automatico está activado, realiza control difuso
        //=====
        if (flagAC == 1) // SI... entonces, inicia el control difuso
        {

            iniciaVar();          // inicializa variables para calcular la salida difusa

            Err = calculaE(SP, lx); // calcula el Error y lo limita a un valor maximo
            dE = calculaDE(Err, Ek_1); // calcula dE y lo limita a un valor máximo
            Ek_1 = Err;           // error pasado

            // Algoritmo difuso -----
            fusificacion(Err, dE); // Fusificacion      -
            baseDeReglas(uE, uD); // base de reglas      -
            Vf = defusificacion(uV); // Defusificacion    -
            //-----
            VCD = VCD + Vf;

            if (VCD > 10.0) { VCD = 10.0; } // la señal de control analogica para
            if (VCD < 1.0) { VCD = 1.0; } // los balastros es de 1 a 10 VCD
            //if (VCD < 0.0) { VCD = 0.0; }

            Vout = VCD*100.0; // = (VCD/2.0)*1000.0/5.0; //1000 xq resolucion_PWM = 9.97 bits
            VoutPWM = (int16)Vout;
            set_pwm1_duty(VoutPWM);

```

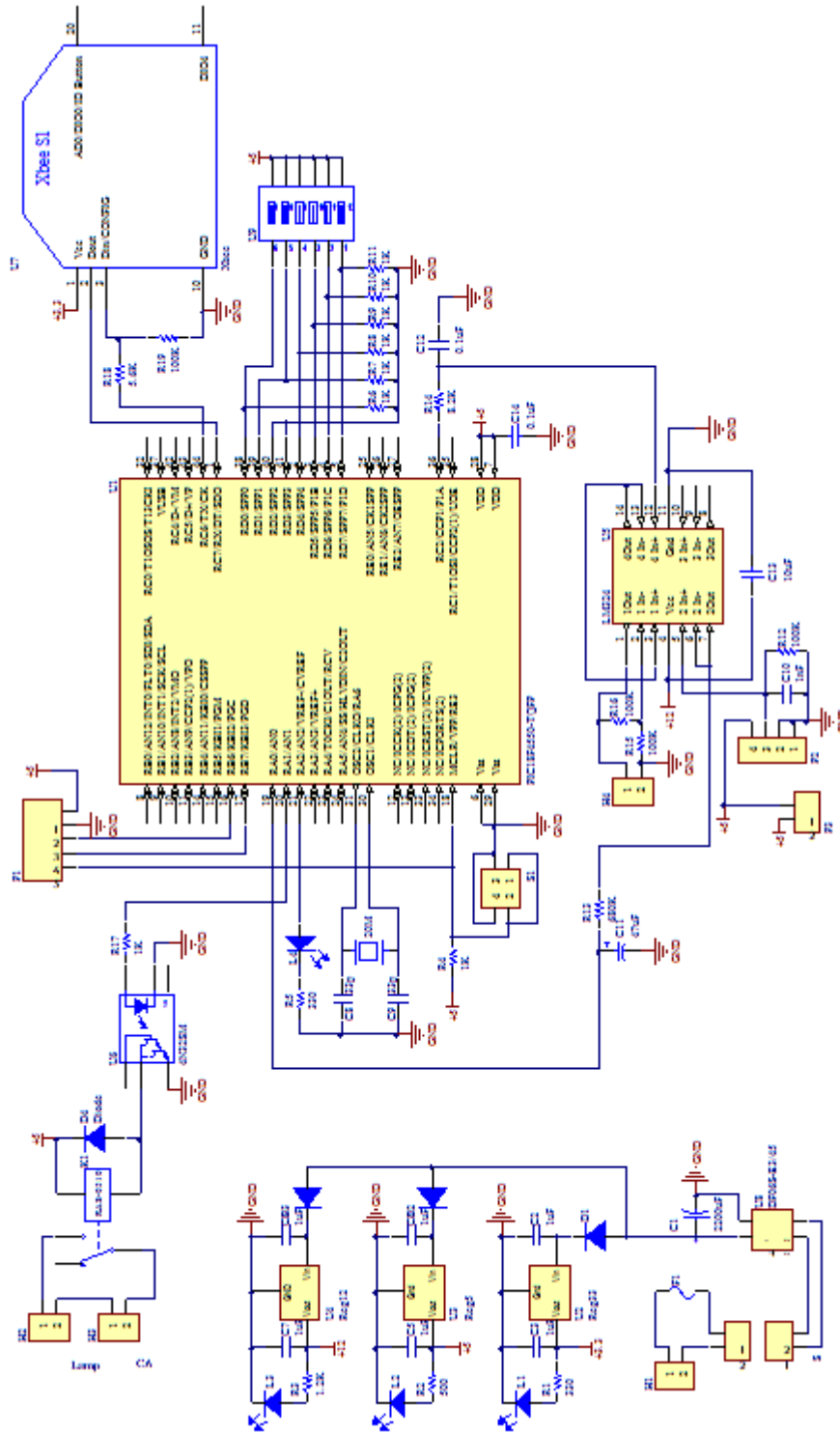
```

if (VoutPWM <= 100)
{
  cont0++;
  if (cont0 >= 160) // equivalente a 1 min
  {
    output_low(PIN_A1); // salida baja para apagar la lámpara
    stateSlave = 0; // bandera lampara apagada
    cont0 = 0;
    flagAgain = 1;
  }
}
if ((flagAgain == 1)&&(Err >= 30)) //50
{
  output_high(PIN_A1); // enciende lampara
  stateSlave = 1; // bandera lampara encendida
  cont0 = 0;
  VoutPWM = 0;
  flagAgain = 0;
}
} // termina controlador difuso
//=====

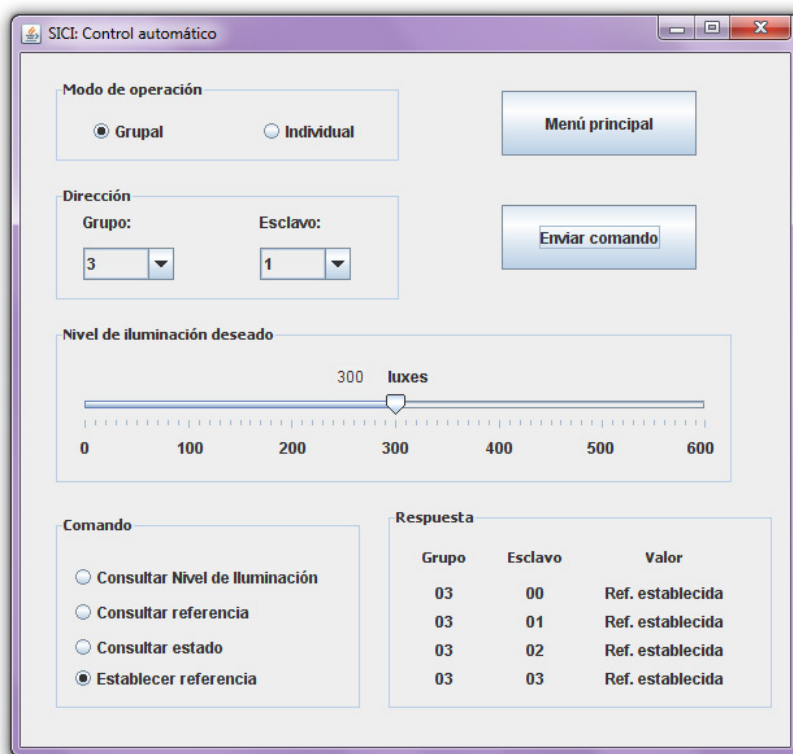
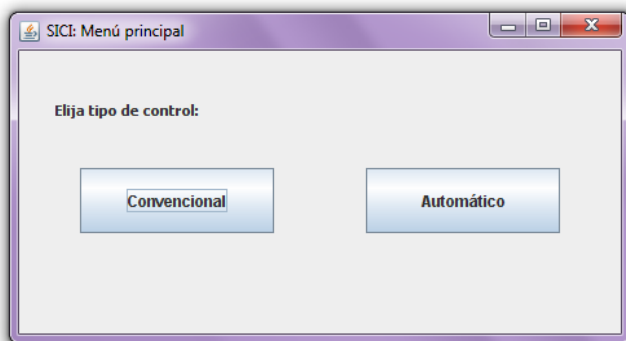
} // termina promedio de sensor
} // termina lectura del sensor
//=====
} // fin del ciclo while
} // fin del main

```

A.2. Diagrama eléctrico del módulo SNLC-SX



A.3. Pantallas de la GUI para operación del SICl



SICI: Control convencional

Modo de operación

Grupal Individual

Dirección

Grupo: Esclavo:

Comando

Consultar nivel de iluminación
 Encender Esclavo
 Apagar Esclavo
 Establecer Escena

Respuesta

Grupo	Esclavo	valor
0	0	Escena establecida
0	1	Escena establecida
0	2	Escena establecida
0	3	Escena establecida

Escenas

1 2 3 4 5
 6 7 8 9 10

Menú principal

Enviar comando

Editar Escenas

SICI: Editar Escenas

Seleccionar escena

Escena	Valor (%)	Escena	Valor (%)
<input type="radio"/> 1	10	<input type="radio"/> 6	60
<input type="radio"/> 2	20	<input type="radio"/> 7	70
<input type="radio"/> 3	30	<input type="radio"/> 8	80
<input type="radio"/> 4	40	<input type="radio"/> 9	90
<input type="radio"/> 5	50	<input checked="" type="radio"/> 10	100

Seleccionar valor

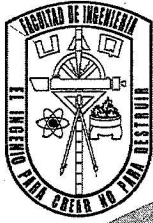
100 %

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Editar **Cancelar**

ANEXOS

**Anexo 1. Participación en 5to. Coloquio de Investigación de la UAQ.
Publicación de artículo en el 7° Congreso de Ingeniería de la UAQ.**



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
5to. Coloquio de Investigación

la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
a través de la FACULTAD DE INGENIERÍA,
otorga el presente

RECONOCIMIENTO

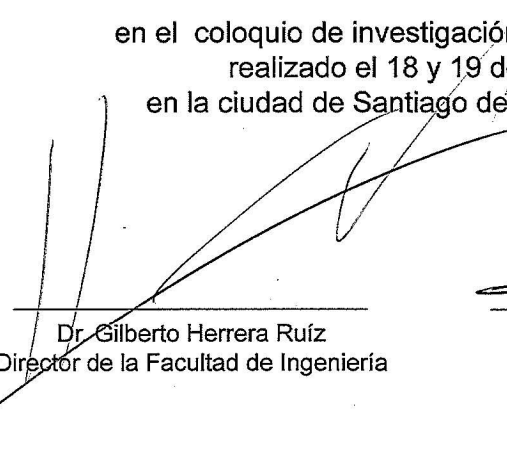
a

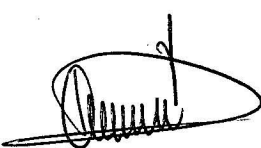
Claudia Aide González Cruz

por haber participado en la sesión de posters

*Diseño de una Red de Sensores para
Control de Aluminação basado en Lógica Difusa*

en el coloquio de investigación en su quinta edición,
realizado el 18 y 19 de noviembre,
en la ciudad de Santiago de Querétaro, México.


Dr. Gilberto Herrera Ruíz
Director de la Facultad de Ingeniería


M. en C. Aurora Femat Díaz
Comité Organizador

DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES PARA CONTROL DE ILUMINACIÓN BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Design of a Sensor's Network for Lighting Control based on Fuzzy Logic

C. A. González-Cruz¹, E. A. Rivas-Araiza²

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de la Campanas S/N, C.P. 76010, Tel. 1 92 12 00 Ext. 7006 y 7001, ¹gocca1703@gmail.com, ²erivas@uaq.mx

RESUMEN: El uso de una red de sensores que monitoree en tiempo real los niveles de iluminación en el interior de un edificio permite obtener las variables de entrada para un controlador inteligente de iluminación basado en lógica difusa que optimice el uso de la iluminación artificial al aprovechar al máximo la iluminación natural proveniente de las fuentes de iluminación externas. La comunicación entre los componentes del sistema se realiza mediante el uso del protocolo de comunicación DALI.

ABSTRACT: The use of a sensor's network that monitor in real-time the light levels inside of a building allows acquire the input variables for an intelligent lighting controller based on fuzzy logic that optimize the use of artificial lighting to maximize the use of daylight from extern light sources. The communication between system components is performed using the DALI communication protocol.

I. INTRODUCCIÓN

La iluminación es fundamental para que el ser humano pueda interactuar con el medio que lo rodea mediante la información recibida a través del proceso visual, de manera que alcanzar los niveles de iluminación adecuados en los espacios de trabajo brinda salud, seguridad y mejor desempeño de las actividades. En la actualidad, el ahorro de energía juega un papel muy importante, no solo por los altos costos que ésta tiene y que impactan tanto a la economía familiar como a la industrial, si no porque también contribuye en la disminución del daño ecológico producido por su generación mediante el uso de combustibles fósiles (Figura 1), proceso que anualmente produce millones de gases de efecto invernadero. Datos del DOE (Department of Energy) de la EIA (Energy Information Agency) indican que México ocupa el décimo tercer lugar a nivel mundial entre las principales naciones que contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero (Tabla 1).

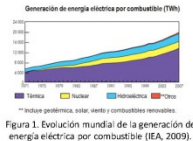


Figura 1. Evolución mundial de la generación de energía eléctrica por combustible (IEA, 2009).

Rango	Nación	CO ₂	Rango	Nación	CO ₂	Rango	Nación	CO ₂	Rango	Nación	CO ₂
1	China	6017.7	6	Alemania	857.6	11	Italia	468.2	16	Australia	417.1
2	EUA	3902.8	7	Canadá	614.3	12	Sudáfrica	443.6	17	Brasil	377.2
3	Rusia	1794.4	8	Raioo Unido	585.7	13	México	435.6	18	España	372.6
4	India	1293.2	9	Corea del sur	514.5	14	Arabia Saudita	424.1	19	Ucrania	328.7
5	Japón	1246.8	10	Irán	471.5	15	Francia	417.8	20	Polonia	303.4

Tabla 1. Veinte países del mundo con las emisiones más altas de dióxido de carbono (EIA-DOE, 2009).

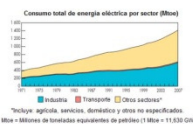


Figura 2. Evolución mundial del consumo de energía eléctrica por sector (IEA, 2009).

La Figura 2 ilustra el consumo mundial de energía eléctrica (EE) por sector en las últimas tres décadas y de ella se puede observar que el sector residencial es uno de los principales consumidores. Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema de control de iluminación para interiores de edificios que garantice el confort visual de los usuarios y disminuya el uso de la energía artificial al aprovechar la iluminación natural proveniente de las fuentes de iluminación externas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema de control de iluminación (SCI) se implementará en el lado izquierdo de la planta alta del CEDIT de la FI de la UAQ (Figura 3) el cual cuenta con un sistema de iluminación basado en apagadores, lámparas fluorescentes y balastos electrónicos, además de ventanas que permiten la entrada de la iluminación natural.

Debido a la complejidad de sus datos y cambios rápidos, la iluminación natural no puede ser fácilmente representada mediante modelos matemáticos, por ello los sistemas de control clásico basados en un regulación continua presentan dificultades para ajustar su funcionamiento. Tomando en cuenta esto, se propone el uso de un controlador difuso que optimice el uso de la iluminación natural, su estructura básica se muestra en la Figura 2 y sus componentes son: *Interfaz de fusificación*: transforma la información de entrada al controlador en información lingüística que puede ser interpretada por la base de reglas y la máquina de inferencias. *Base de Reglas*: Contiene el conocimiento experto resumido en un conjunto de reglas del tipo "si... entonces...". *Máquina de Inferencias*: simula el proceso de toma de decisiones del experto, teniendo en cuenta la base de reglas y el conocimiento difuso del proceso. *Interfa de defusificación*: que convierte las conclusiones de la máquina de inferencia en acciones de control.

La comunicación entre dispositivos se lleva a cabo mediante el protocolo de comunicación DALI (Digital Addressable Lighting Interface), el cual es un estándar (IEC 929) para sistemas de iluminación definido por la industria de la iluminación. DALI permite instalar sobre un mismo bus todos los componentes del sistema, ofrece ventajas como fácil cableado, direccionamiento individual o por grupos de las lámparas, control simultaneo de todos sus componentes, monitoreo del estado de los balastos entre otros. Las estructuras de comunicación DALI se muestran en la Figura 5.

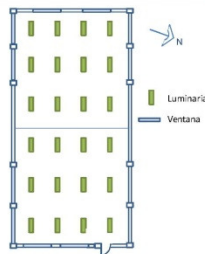


Figura 3. Vista superior izquierda de la planta alta del CEDIT

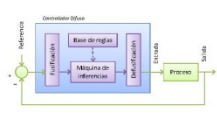


Figura 4. Diagrama básico de un controlador difuso.

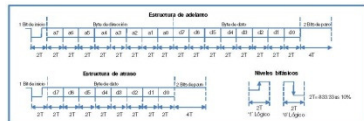
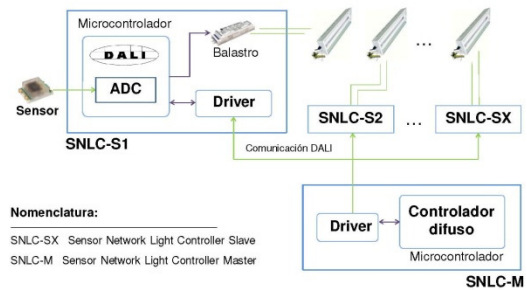


Figura 5. Estructuras de comunicación DALI

El diseño de una red de sensores de iluminación permite el monitoreo en tiempo real los niveles de iluminación del espacio de trabajo, estas mediciones son tomadas como variables de entrada del controlador difuso encargado de tomar la acción de control adecuada y aplicarla sobre los dispositivos actuadores (balastos) que finalmente suministran el nivel de potencia correspondiente a las lámparas, el diagrama esquemático del sistema propuesto se muestra en la Figura 6.



Nomenclatura:

SNLC-SX Sensor Network Light Controller Slave
 SNLC-M Sensor Network Light Controller Master

Figura 6. Elementos del sistema de control de iluminación propuesto.

De manera general el funcionamiento del sistema es el siguiente: la unidad maestra continuamente pide los datos obtenidos de los sensores de iluminación a la unidad esclava y de acuerdo al software del controlador contenido en ella, la unidad maestra responde con la acción de control correspondiente a la unidad esclava, quien regula la potencia eléctrica del balastro y con ello el nivel de iluminación de las lámparas.

IV. DISCUSIONES

Una de las problemáticas que enfrentan los sistemas de control de iluminación automáticos radica en la exactitud de la lectura de las variables de entrada obtenidas mediante los sensores de iluminación, así como su buen funcionamiento a lo largo de su vida útil, ya que de ellos depende la toma de la acción de control que garantice la salida correcta del sistema. Además es importante tomar en cuenta el número de sensores a utilizar a fin de garantizar una buena caracterización de los niveles de iluminación del área de trabajo, que aparte de influir en el funcionamiento del sistema, establece los parámetros para el diseño del controlador.

V. CONCLUSIONES

El control difuso es una de las mejores técnicas para control de iluminación, diversas investigaciones, han demostrado que técnicas de control basadas en lógica difusa presentan buenos resultados al controlar el ambiente interior de edificios, mejorar la dinámica del sistema, permitir un buen funcionamiento, estabilizar el voltaje sin afectar la calidad de la iluminación y ahorrar energía eléctrica (Trobec, et al., 2006; Pan, et al., 2008; Luna-Rubio, et al., 2009; Wang G.-J., et al., 2009; Yang y Nam, 2010). La incorporación de una red de sensores permite el control en tiempo real, mientras que la comunicación entre los diferentes dispositivos que integran el sistema se lleva a cabo mediante el uso de DALI.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cziker, A.; Chindris, M. y Miron, A. 2008b. Fuzzy Controller for a Shaded Daylighting System. 2008. 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM2008.
 Luna-Rubio, R.; Herrera-Ruiz, G.; Trejo-Perea, M.; Vargas-Vázquez, D. y Ríos-Moreno, G.J. 2009. Lighting Automatic Control System for Intelligent Buildings. International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.), Vol. xx, n. x.
 Pan, M.S.; Yeh, L.W.; Chen, Y.A.; Lin, Y.H. y Tseng, Y.C. 2008. Design and Implementation of a WSN-Based Intelligent Light Control System. ICDCS '08. 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops.
 Trobec, L.M.; Zupancic, B.; Peternelj, J. y Krainer, A. 2006. Daylight illumination control with fuzzy logic. Solar Energy 80, pp. 307-321.
 Wang, G.J., Gu, S. y Wang, Z.X. 2009. The design of fuzzy control system for power saving lighting on MATLAB. IEEE Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp. 455 - 458.
 Yang, I.H., y Nam, E.J. 2010. Economic analysis of the daylight-linked lighting control system in office buildings. Solar Energy 84, pp. 1513-1525.

Diseño de una red de sensores para control de iluminación basada en lógica difusa

Design of a sensor's network for lighting control based on fuzzy logic

Claudia Aide González Cruz¹, Edgar Alejandro Rivas Araiza²

Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro

¹cgonzalez31@alumnos.uaq.mx, ²erivas@uaq.mx

RESUMEN. Hoy en día un edificio inteligente siempre incluye un sistema de iluminación inteligente; cuyos principales objetivos son la funcionalidad, conveniencia y ahorro de energía. Las exigencias de un desarrollo sustentable en el mundo actual nos llevan a desarrollar sistemas que garanticen la satisfacción de nuestras necesidades sobre el máximo aprovechamiento de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente. Esta investigación presenta el desarrollo de un sistema de control automático inteligente de iluminación para interiores de edificios, basado en una red de sensores que aprovechan el uso de la iluminación natural a fin de disminuir el uso de fuentes complementarias de iluminación (iluminación artificial) y con ello reducir el consumo de energía eléctrica, además de brindar condiciones de confort visual para los usuarios. El sistema funciona bajo el modo maestro-esclavo y una interfaz gráfica que permite el monitoreo del sistema y variables lumínicas. La regulación de la potencia que los balastos entregan a las luminarias se lleva a cabo haciendo uso de un controlador basado en lógica difusa.

Palabras clave: Red de sensores, Lógica difusa, Confort visual, Ahorro de energía.

1. INTRODUCCIÓN

La iluminación es una de las principales necesidades del ser humano ya que facilita la visión, la cual es la más importante fuente de información en el mundo (Aries, 2007). Además de un efecto visual la iluminación tiene efectos biológicos no visuales en el cuerpo humano, *i.e.*, un adecuado nivel de iluminación tiene efectos positivos en la salud, el ánimo, el ritmo circadiano, el estado de alerta, el comportamiento e incluso en la calidad del sueño (Bommel, 2006; Webb, 2006); al mismo tiempo que brinda bienestar, salud y seguridad en el desempeño de las actividades.

Por otra parte, el ahorro de energía juega un papel muy importante en la actualidad no solo por los altos costos de la misma que impactan tanto a la economía familiar como a la industrial, sino porque también contribuye en la disminución de los gases de efecto invernadero producidos durante la quema de combustibles fósiles para su generación. Datos de la IEA (*International Energy Agency*) en 2010 indican que del total de energía eléctrica generada en el mundo el 67.8% se produce mediante la quema de hidrocarburos, 15.9% a través de energía hidráulica, 13.5% se genera por el uso de energía nuclear y el 2.8% por energías renovables; de la misma forma el Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés) de la EIA informa que en 2009 México ocupa el onceavo lugar a nivel mundial en emisiones de gases de efecto invernadero (Tabla 1).

Entre el 30% y 45% del total de energía eléctrica consumida en un edificio se debe típicamente a la iluminación, por ello ésta área se ha convertido en un sector con amplio potencial para ahorro de energía (Cziker et al., 2007), además la instalación eléctrica tradicional basada en el simple cableado de interruptores, atenuadores y lámparas se ha convertido en inadecuada para cumplir con las demandas de la tecnología de iluminación moderna, de manera que se han desarrollado sistemas de control automático que permiten el control individual y/o grupal de los componentes de un sistema de iluminación; por otra parte, las exigencias de un desarrollo sustentable han llevado a la humanidad a implementar medidas para aprovechar al máximo los recursos naturales y causar el menor daño posible en el medio ambiente.

Tabla 1. Países del mundo con las producciones más altas de CO₂ (EIA-DOE, 2009).

Rango	Nación	CO ₂ [*]	Rango	Nación	CO ₂ [*]
1	China	7234.30	11	México	643.30
2	EUA	6931.40	12	Indonesia	582.90
3	Rusia	5049.20	13	Corea del Sur	568.70
4	India	1947.40	14	Italia	562.40
5	Japón	1866.10	15	Australia	559.00
6	Brasil	1356.30	16	Irán	555.90
7	Alemania	1011.90	17	Francia	568.70
8	Canadá	975.30	18	Ucrania	493.90
9	Reino Unido	739.30	19	España	436.50
10	Irán	645.40	20	Sudáfrica	422.80

* Millones de toneladas

2. ASPECTOS GENERALES DE LA ILUMINACIÓN

La iluminación es fundamental para que el ser humano pueda interactuar con el medio que lo rodea, mediante la información recibida a través del proceso visual; junto con el ambiente térmico y acústico, el ambiente lumínico forma parte del ambiente global en los espacios interiores.

Las unidades de iluminación se utilizan para medir cuantitativamente la luz; algunas de ellas son: *flujo luminoso*, indica la cantidad de luz que emite la fuente luminosa hacia el espacio circundante por unidad de tiempo, medido en lúmenes (lm); *intensidad luminosa*, es la parte del flujo emitido por una fuente luminosa en una dirección dada por el ángulo sólido que lo contiene, su unidad de medida es la candela (cd); *iluminación o iluminancia*, medida en luxes (lx) expresa el flujo luminoso que incide sobre una superficie, esta magnitud de iluminación tiene una gran importancia en cuanto al confort visual y es considerada como un parámetro normativo lumínico.

Otros términos importantes son el *deslumbramiento* y el *color de la luz*. El *deslumbramiento* es la sensación producida por áreas brillantes dentro del campo de visión, producto de un excesivo contraste de iluminancias dentro del campo visual, resultando molesto para la visión. El *color de la luz* se basa en dos conceptos, a) la temperatura de color (Tc), que expresa el color de una fuente de luz comparándola con la luz emitida por un cuerpo negro a una temperatura determinada y b) el índice de rendimiento de color (IRC), que relaciona porcentualmente por comparación con una fuente de luz perfecta la reproducción del color de los objetos, a mayor porcentaje de IRC, mayor será el nivel de reproducción de color.

Lograr el confort visual implica alcanzar el nivel de iluminación adecuado para la actividad a realizar, de manera que ésta se realice con el menor esfuerzo visual posible; sus principales parámetros son: el nivel de iluminación, el deslumbramiento y el color de la luz. El nivel de iluminación que asegure el confort de los usuarios depende de la actividad que se desarrolle en el espacio de trabajo, la Norma Europea UNE-EN 12464-1 así como la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 establecen niveles para diferentes tareas en distintos lugares. En edificios educativos el rango varía entre 200 lx y 500 lx dependiendo de la actividad desarrollada. Por su parte el nivel de deslumbramiento y el color de la luz son parámetros que se controlan mediante el diseño arquitectónico y de espacios, así como un análisis de luminotecnia.

3. ESTRATEGIAS DE CONTROL DE ILUMINACIÓN

Un sistema de control de iluminación tiene como principales objetivos la funcionalidad, conveniencia y reducción del consumo de energía eléctrica; no obstante, para obtener un sistema de iluminación de calidad se debe cumplir con tres requisitos básicos: 1) el sistema debe ser económico, entendiendo que además de proporcionar un menor consumo de energía eléctrica también debe ser de fácil instalación y bajos costos de operación y mantenimiento; 2) debe proporcionar bienestar al usuario, es decir alcanzar los niveles de confort

visual que brinden al usuario salud y seguridad en el desarrollo de sus actividades; y por último, 3) cuidar la estética, lo cual involucra la forma y el estilo en los componentes del sistema y su instalación.

Existen diferentes tipos de estrategias para control de iluminación entre las que destacan las siguientes:

- *Regulación manual*: es una estrategia en la que básicamente el usuario limita de forma manual la cantidad de energía eléctrica que se suministra a las lámparas mediante el uso de un dimmer (regulador luminoso).
- *Detección de ocupantes*: en ésta, las lámparas son encendidas o apagadas de acuerdo a la detección de ocupantes mediante sensores de presencia (Roisin et al., 2008).
- *Compensación adaptativa*: en éste tipo de estrategia de control la iluminación natural es compensada con la iluminación artificial y la cantidad en que aumenta o disminuye el uso de la iluminación artificial se establece de acuerdo a un análisis previo del comportamiento de la iluminación natural en el interior del edificio (Luna-Rubio et al., 2009).
- *Programación*: el horario de encendido o apagado de las lámparas es programado por el usuario.
- *Uso de la iluminación natural*: las lámparas son activadas de acuerdo a la presencia de la iluminación natural detectada mediante sensores de iluminación o conforme a un análisis previo de la iluminación en el interior del edificio durante el día (Roisin et al., 2008).

Cualquiera de las anteriores resulta viable de acuerdo a las necesidades y posibilidades del usuario, pero sin lugar a dudas en cuanto a iluminación se refiere la mejor estrategia para optimizar la eficiencia energética es el uso de la luz natural (Mansy, 2004).

4. CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Se considera que el concepto de lógica difusa apareció en 1965 en la Universidad de California en Berkeley, introducido por Lotfi A. Zadeh y desde entonces pese a su corta historia ha tenido un rápido crecimiento, ya que de forma exitosa enfrenta situaciones del mundo real con el diseño e implementación de controladores difusos en diversos campos como son el automotriz y electrodomésticos por mencionar algunos (Noriega, 2010).

La técnica de control difuso es una herramienta poderosa de control no lineal que trata de emular la manera en que el cerebro humano razona, ha sido considerada por diferentes investigadores como el mejor método para controlar los sistemas de iluminación debido a su flexibilidad para permitir los cambios multivariables de la iluminación natural en términos de conjuntos difusos (Mansy, 2004; Luna-Rubio et al., 2009, Huang et al., 2010). Estos conjuntos se combinan en reglas para definir acciones. Básicamente un controlador difuso está formado por los siguientes elementos: una interfaz de *fusificación* de entradas, una *máquina de inferencias*, una *base de reglas* y una interfaz de *defusificación* de las salidas. Su esquema básico es el que se muestra en la Figura 1.

La *fusificación* es el proceso en el que se obtiene el grado de pertenencia de un elemento (entrada del sistema, *i.e.*, lecturas de los sensores) a un conjunto difuso, mediante un tipo de fusificador específico, el cual está determinado por su función de pertenencia (o membresía) pudiendo ser de tipo triangular, trapezoidal, singleton o gaussiano (Figura 2). En función del valor observado se realiza una correspondencia con cada uno de los distintos conjuntos difusos propuestos con un grado de pertenencia $\mu(x)$.

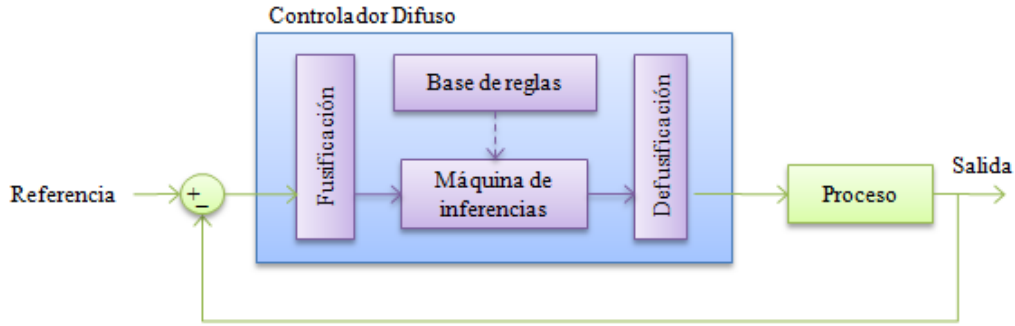


Figura 1. Estructura básica de un controlador basado en lógica difusa.

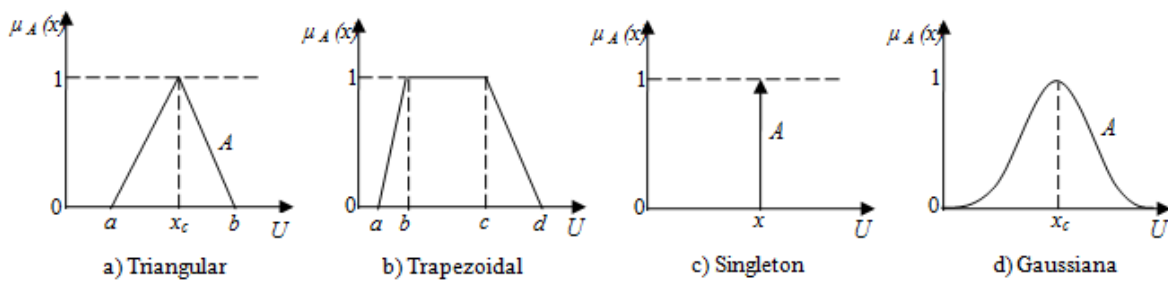


Figura 2. Funciones de membresía para la fusificación de variables.

La *base de reglas* almacena un conjunto de reglas del tipo “SI...ENTONCES” que contienen el conocimiento obtenido mediante un proceso de experimentación realizado por el diseñador del controlador; con base a estas reglas, en la *máquina de inferencias* es simulado el proceso de toma de decisiones del experto y se obtienen conclusiones sobre la acción correctiva a tomar en función de las expresiones lingüísticas generadas a partir del proceso de fusificación.

Por último, la *defusificación* combina las conclusiones de la máquina de inferencias y las convierte en un valor numérico real para poder ser utilizado como salida del controlador. Existen tres tipos de defusificadores: *defusificador del criterio máximo* en el que la salida es el valor numérico del punto donde la función de pertenencia del conjunto difuso de salida asume su valor máximo; *defusificador del centro de gravedad* el cual establece la variable de salida como el centro del área cubierta por la función de pertenencia del conjunto difuso de salida, y *defusificador del promedio de los centros* que determina la variable de salida como el promedio de los centros de los conjuntos difusos de salida.

En el desarrollo de este trabajo se utilizan fusificadores *triangulares* y *trapezoidales*, cuyas formulas matemáticas para están dadas por las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente:

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & , \text{si } b \leq x^* \leq c \\ 1 - \frac{|b - x^*|}{b - a} & , \text{si } a < x^* < b \\ 1 - \frac{|x^* - c|}{d - c} & , \text{si } c < x^* < d \\ 0 & , \text{de otra manera} \end{cases} \quad (1)$$

Donde a, b, c y d son los parámetros de la función trapezoidal.

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & , \text{si } x^* = x_c \\ 1 - \frac{|x_c - x^*|}{x_c - a} & , \text{si } a < x^* < x_c \\ 1 - \frac{|x_c - x^*|}{b - x_c} & , \text{si } x_c < x^* < b \\ 0 & , \text{de otra manera} \end{cases} \quad (2)$$

Donde a , b y x_c son los parámetros de la función triangular.

El tipo de defusificador empleado es el de *centro de gravedad*:

$$z^* = \frac{\int_V \mu_B(z) z dz}{\int_V \mu_B(z) dz} \quad (3)$$

Donde z^* es la variable de salida y B es el conjunto difuso de salida.

5. SISTEMA DE CONTROL USANDO LÓGICA DIFUSA

5.1. Consideraciones

Diferentes aspectos intervienen en la cantidad de iluminación natural que entra a un edificio como son la orientación, el número y tamaño de las ventanas con las que se cuenta, la vegetación de los alrededores, la cual puede interferir en la captación de la iluminación solar, así como cambios climáticos a consecuencia de las diferentes estaciones del año, etc. El sistema de control de iluminación se considera implementar en el lado izquierdo de la planta alta del Centro de Diseño e Innovación Tecnológica (CEDIT) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) donde se llevan a cabo actividades de tipo educativas; su sistema de iluminación está basado en lámparas fluorescentes, balastos electromagnéticos e interruptores sencillos de energía eléctrica (Figura 3).



Figura 2. a) Vista superior de la planta alta del CEDIT, b) Interior del área de trabajo.

5.2. Propuesta del controlador

Dado que el CEDIT cuenta con ventanas que durante el día favorecen la entrada de iluminación natural, se plantea el desarrollo de un sistema de control que aproveche este recurso natural. La estructura del sistema de

control de iluminación propuesto consiste en cuatro tipos de componentes principales: dispositivos sensores un circuito lógico de control, un controlador de energía y dispositivos de salida (Figura 4).

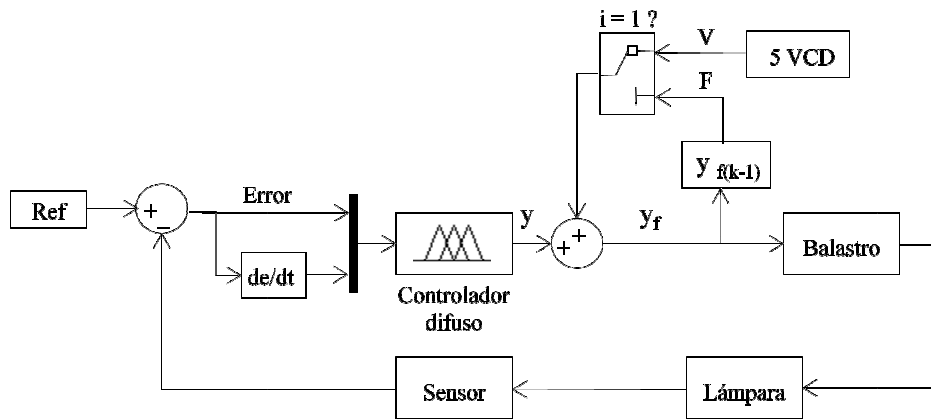


Figura 3. Esquema del sistema de control de iluminación propuesto.

Como sensor se utiliza el dispositivo fotosensible de luz ambiental OSRAM SFH-5711 que ofrece una perfecta relación con la sensibilidad espectral del ojo humano y el cual entrega a su salida una corriente logarítmica expresada por la Ecuación 4, de manera que con base en la corriente a la salida del sensor (I_{out}) se puede determinar la iluminancia media (E_v) en el área de trabajo.

$$I_{out} = S * \log (E_v/E_o) \tag{4}$$

Donde:

- E_v es la iluminancia media
- $E_o = 1 \text{ lx}$
- $S = 10\mu\text{A/dec}$

El circuito lógico de control de iluminación del sistema consiste en un controlador difuso que continuamente manda señales analógicas de bajo voltaje (0-10 V) al controlador de energía (balastro electrónico regulable), al recibir esta señal el balastro cambia el flujo de corriente que circula a través de las lámparas (dispositivo de salida) a fin de mantener el nivel de iluminación dado como referencia en el espacio de trabajo.

El controlador difuso propuesto toma como variables de entrada el error (diferencia entre la referencia dada por el usuario y el valor de iluminación medido con el sensor) y la pendiente del error, mientras que la variable de salida es el nivel de voltaje de CD que se envía al balastro. Los tipos de fusificadores empleados son del tipo triangulares y trapezoidales y el método de defusificación utilizado es el de *centro de gravedad*. Los conjuntos difusos para cada variable, ya sea de entrada o salida, son los que se listan en la Tabla 2 y sus rangos de valores difusos son los mostrados en las Figuras 5, 6 y 7. La Tabla 3 resume las reglas que definiendo la inteligencia del sistema de control.

Tabla 2. Etiquetas para los conjuntos difusos de las variables de entrada y salida

Variables de entrada				Variable de salida	
<i>Error</i>		<i>Pendiente del error</i>		<i>Nivel de VCD</i>	
NEA	Negativo alto	NEA	Negativo alto	MB	Muy bajo
NEB	Negativo bajo	NEB	Negativo bajo	BA	Bajo
CE	Cero	NH	No hay	NC	No cambia
POB	Positivo bajo	POB	Positivo bajo	AL	Alto
POA	Positivo alto	POA	Positivo alto	MA	Muy alto

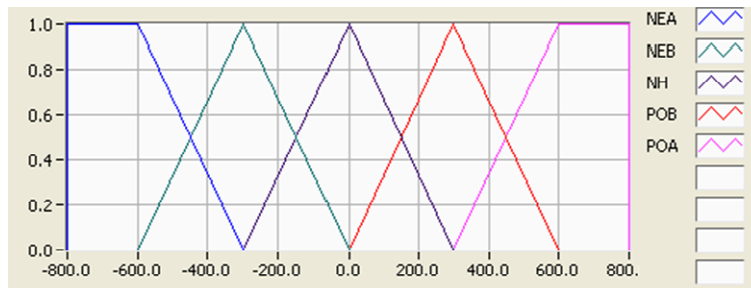


Figura 4. Conjuntos difusos para la variable de entrada *Error*.

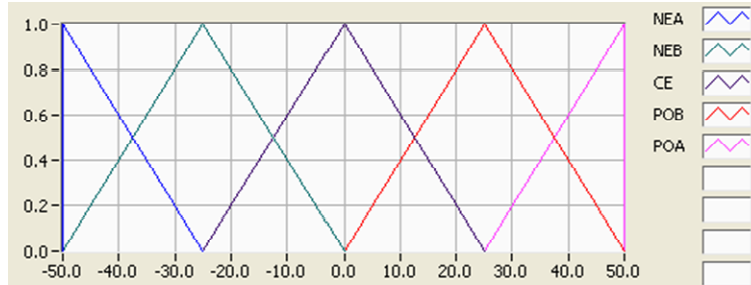


Figura 5. Conjuntos difusos para la variable de entrada *Pendiente*.

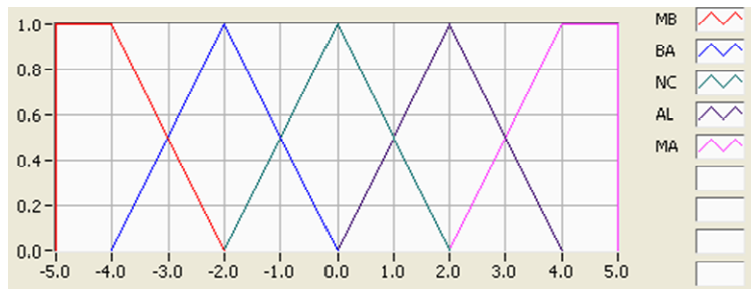


Figura 7. Conjuntos difusos para la variable de salida *Nivel de VCD*.

Tabla 3. Base de reglas del controlador.

μ_x		Pendiente				
		NEA	NEB	NH	MI	I
Error	NEA	MB	MB	BA	BA	NC
	NEB	MB	BA	BA	NC	AL
	CE	BA	BA	NC	AL	AL
	POB	Ba	NC	AL	AL	MA
	POA	NC	AL	AL	MA	MA

5.3. Implementación

El diagrama esquemático del sistema de control de iluminación propuesto es mostrado en la Figura 8. La señal analógica del nivel de iluminación medido por el sensor es adquirida usando uno de los convertidores A/D de la tarjeta de adquisición ADVANTECH 4711 y procesada en LabVIEW de acuerdo a la Ecuación 1 para obtener su correspondiente valor en *luxes*. En LabVIEW también es implementado el controlador difuso descrito anteriormente (Figura 9), cuya salida es suministrada al balastro usando una de las salidas analógicas de 0 – 10 V de la misma tarjeta de adquisición. La implementación física del sistema se muestra en la Figura 10.

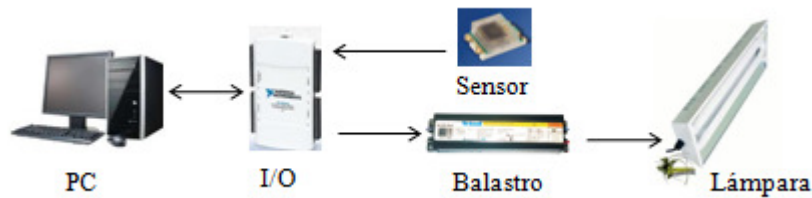


Figura 8. Diagrama esquemático de funcionamiento del sistema.

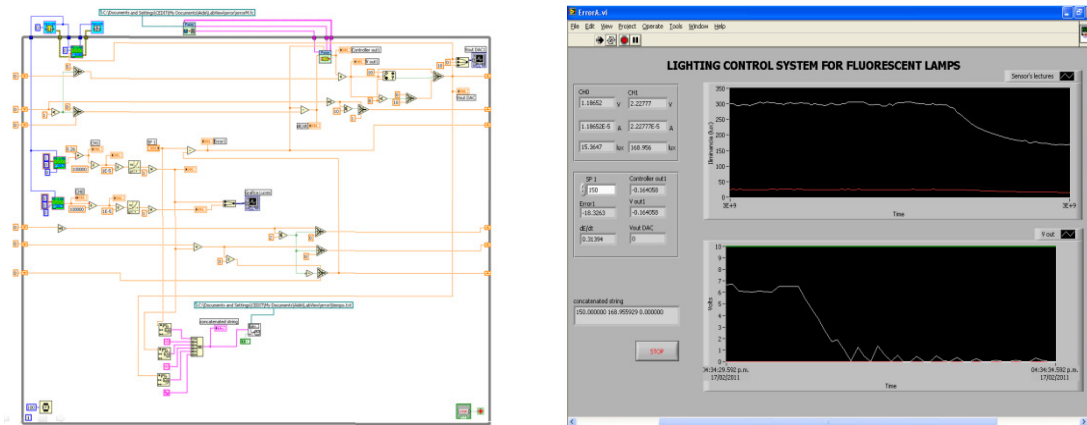


Figura 9. Diagrama de bloques y panel frontal de la interfaz gráfica en LabVIEW.



Figura 10. Implementación física del sistema.

6. RESULTADOS

Pruebas realizadas para conocer el desempeño del sistema demuestran que el consumo de corriente del balastro sobre la línea de alimentación así como el nivel de iluminación que proporcionan las lámparas a su salida, se comportan en forma ascendente conforme la entrada de control analógica aumenta y viceversa, disminuye al mismo tiempo que la señal de control lo hace (Figura 11).

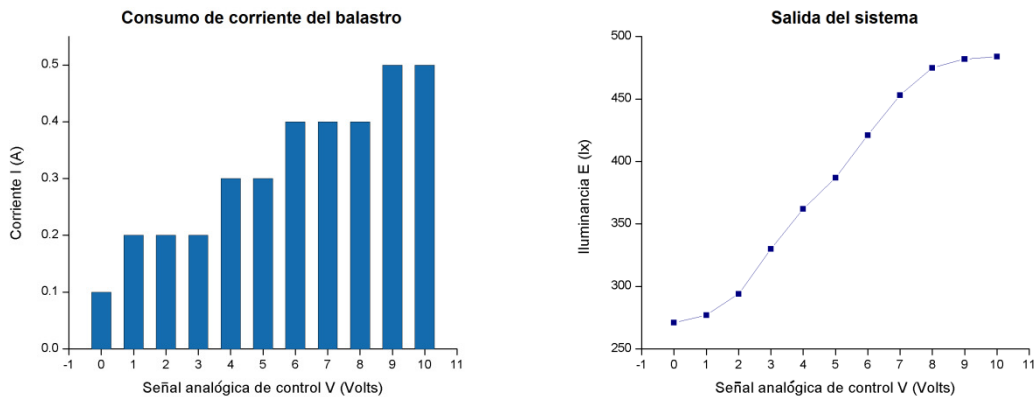


Figura 11. Consumo de corriente del balastro y nivel de iluminancia de salida de las lámparas.

Por su parte al seleccionar diferentes niveles de iluminación el controlador muestra un desempeño favorable, en el que el sistema alcanza la referencia en un tiempo aproximado de 3.5 segundos con un comportamiento lineal, razón por la cual no se presentan parpadeos que molesten la percepción visual del usuario. La Figura 12 muestra la respuesta del sistema y la salida del controlador.

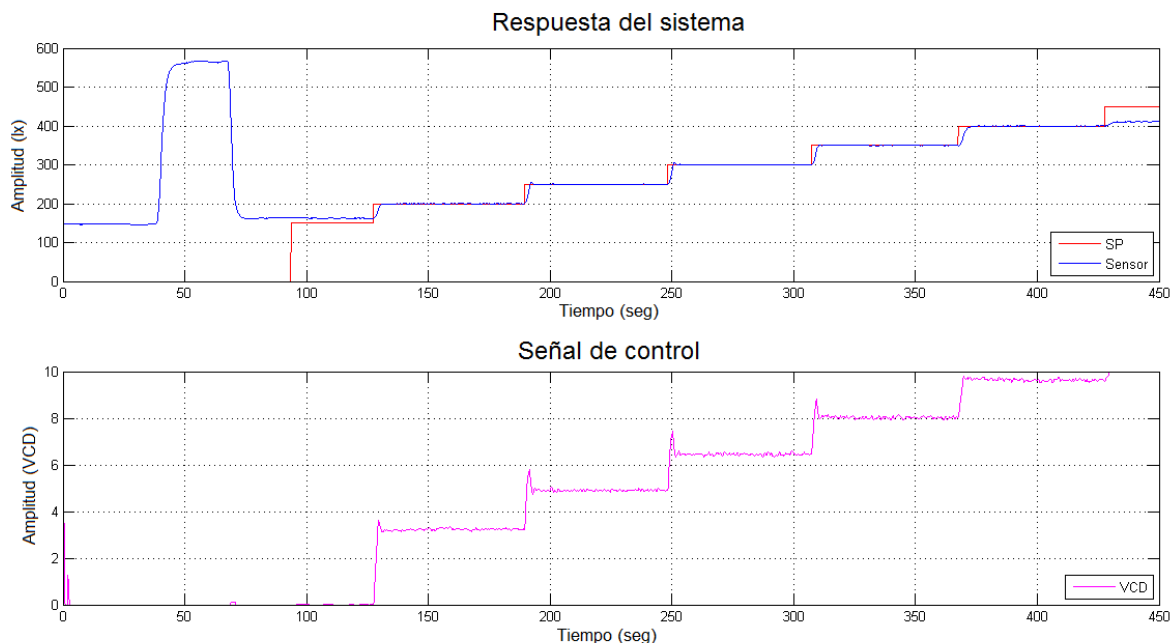


Figura 12. Respuesta del sistema y señal de control aplicada a los balastos.

En las gráficas se puede apreciar que el sistema alcanza la referencia y se mantiene mientras no se indique un nuevo valor. La lectura de 147 luxes mostrada al inicio de la primer gráfica corresponde al nivel de iluminación en el área de trabajo con la presencia sólo de la iluminación natural (luz de día), los 550 luxes detectados corresponden a la máxima medición alcanzada (presencia de la luz del día y con el totalidad de las lámparas del CEDIT encendidas); posterior a éstas lecturas la iluminación artificial fue apagada de manera que se pudo comprobar cómo a medida que el usuario solicita al sistema un valor de iluminación superior, el controlador incrementa el nivel de voltaje suministrado al balastro y viceversa.

Al final de la gráfica se aprecia que el máximo nivel de iluminación alcanzado sobre el área de trabajo es de 408 luxes, un valor superior a éste no puede ser alcanzado debido a la naturaleza física del sistema, no obstante este resultado es satisfactorio puesto que las actividades realizadas en el área de trabajo no requieren valores superiores a 400 luxes.

Cabe destacar que en las pruebas realizadas para la validación del controlador se tuvo únicamente el efecto de un par de lámparas sobre el área de trabajo lo que indica que dependiendo de la capacidad del sistema la iluminación pueden alcanzar niveles superiores.

7. Conclusiones

El controlador difuso es una de las mejores opciones para control de iluminación debido a su flexibilidad para tomar en cuenta las no linealidades de la luz natural, además ofrece la ventaja de que sus reglas son combinadas fácilmente con el hardware. El controlador implementado resultó lo suficientemente adecuado para mantener el nivel de iluminación deseado en el espacio de trabajo, mientras se obtiene un ahorro en el consumo de energía eléctrica.

La robustez del sistema de control de iluminación propuesto permite expandir el mismo a mayor número de lámparas en el edificio.

8. Bibliografía

- Aries M. Newsham G. 2007. Effect of daylight saving time on lighting energy use: A literature review. Ottawa, Canada : ELSEVIER, Energy Policy 36, págs. 1858-1866.
- Bommel W.J.M, 2006. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. Applied Ergonomics 37 (2006), pp. 461–466.
- Cziker A., Chindris M. y Miron A. 2007. Implementation of Fuzzy Logic in Daylightin Control. Budapest, Hungary : s.n., 11th International Conference on Intelligent Engineering Systems., págs. 195-200.
- Huang, Y.; Wu, L. y Zhu, J. 2010. Research of Fuzzy Control System about Greenhouse Supplement Light Lamps Based on Single-chip Microcomputer. Proceedings of the 8th World Congress in Intelligent Control and Automation, pp. 3751 - 3754.
- Luna-Rubio R., Herrera-Ruiz G., Trejo-Perea M., Vargas-Vázquez D., Ríos-Moreno G.J. 2009. Lighting Automatic Control System for Intelligent Buildings. International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.), Vol. xx, n. x.
- Mansy, K. 2004. A user-friendly procedure to visualize the hourly quantitative performance of daylighting systems. Solar Energy , 77, pp. 373-380.
- Noriega A., 2010. Apuntes de Control Inteligente. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería; pp. 1-24.
- Roisin, B., Bodart, M., Deneyer, A., D’Herdt, P. 2008. Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption. Energy and Buldings 40, pp. 514-523.
- Webb, A. 2006. Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light. Energy and Buildings 38 (2006), pp. 721–727.