

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SISTEMA DE ILUMINACIÓN AUTOMÁTICO PARA EDIFICIOS INTELIGENTES: CONFORT VISUAL Y AHORRO ENERGÉTICO

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS
CON LÍNEA TERMINAL EN INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO

PRESENTA

ING. RICARDO LUNA RUBIO
EXPEDIENTE 122051

DIRIGIDA POR:

Dr. JOSÉ GABRIEL RÍOS MORENO

C.U. SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. AGOSTO DE 2009

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias
con Línea Terminal en Instrumentación y Control Automático

Sistema de Iluminación Automático para
Edificios Inteligentes: Confort Visual y Ahorro Energético

TESIS

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

Presenta:

Ing. Ricardo Luna Rubio

Dirigido por:

Dr. José Gabriel Ríos Moreno

SINODALES

Dr. José Gabriel Ríos Moreno
Presidente


Firma

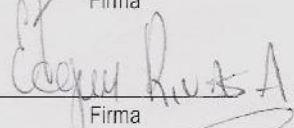
Dr. Mario Trejo Perea
Secretario


Firma

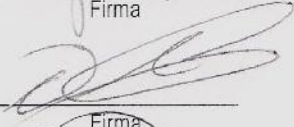
Dr. Damián Vargas Vázquez
Vocal


Firma

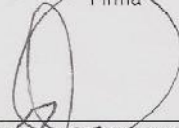
Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza
Suplente


Firma

Dr. Eusebio Ventura Ramos
Suplente


Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad


Firma
Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Agosto de 2009
México

RESUMEN

El presente trabajo plantea una alternativa para ahorrar energía eléctrica en salones de clase mediante un sistema experimental de control automático de iluminación. Por medio de una regulación automática de iluminación, este sistema ofrece un ambiente lumínico confortable (con base en el estándar internacional IEC-12464). Tres sistemas de iluminación fueron comparados: un sistema convencional; un sistema con un control horario (encendido-apagado automático); y un sistema de iluminación regulable (basado en lógica difusa). Tomando como referencia el sistema con un control horario, resultados de pruebas y simulaciones mostraron que no solo se reduce el desperdicio de energía, sino que el consumo eléctrico usual es reducido alrededor de 90%. Tal sistema podría servir como prototipo para ser usado en toda la Facultad de Ingeniería.

(Palabras clave: iluminación regulable; confort visual; lógica difusa; edificio inteligente; eficiencia eléctrica).

SUMMARY

This work presents an alternative for saving electrical energy in classrooms by mean of an experimental automatic lighting control system. By using daylighting control, this system offers indoor lighting environment comfortable (according to standard IEC-12464). Three lighting different systems were compared: a conventional system; a system with a schedule control (automatic on-off); and a system with an automatic daylighting control (based on fuzzy logic). Using the system with a schedule control as a reference, test and simulations results showed that with the daylighting control system not only is wasted energy reduced, but also usual electrical consumption decrease around 90%. Such a system may serve as a prototype to be used throughout the School of Engineering.

(**Keywords:** Daylighting control, visual comfort, fuzzy logic, electrical efficiency, intelligent building).

**A Dios, a
Esperanza Rubio Suárez,
a mi hermana Carolina Luna Rubio,
a mis hermanos José Alberto Luna Rubio y
José Luis Luna Rubio**

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a las personas que se han cruzado en mi camino, quienes me han tendido su mano brindándome su apoyo y me han iluminado con su presencia. Son muchas personas las que debería nombrar en esta sección, pero me quedare con las más trascendentales durante esta etapa.

En primer lugar quiero agradecer a **Dios** por permitirme lograr una meta más en mi vida, por ser mi proveedor y mi guía, por las oportunidades que ha puesto en mi camino y por los ángeles que me ha mandado para mi protección y apoyo a quienes simplemente llamo **amigos**.

Debo dar gracias a mi **madre**, por la oportunidad de existir, por su ejemplo de superación incansable, por su comprensión, su guía, sus consejos, por su apoyo y su confianza.

Quiero expresar mi reconocimiento y gratitud a mi director de tesis **Dr. José Gabriel Ríos Moreno** por su tiempo y dedicación para el buen desarrollo del presente trabajo, por la amistad y la confianza depositada en un mi persona. A mis sinodales **Dr. Mario Trejo Perea**, **Dr. Damián Vargas Vázquez**, **Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza** y **Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos** (a quienes además de maestros, los considero grandes amigos), por su guía, por los consejos brindados, por sus comentarios y el tiempo dedicado al presente trabajo, así como por la oportunidad brindada al permitirme colaborar en equipo para la generación de producción científica.

A **mis profesores** por las enseñanzas y la guía brindada en este proceso de mi formación profesional, en especial quiero agradecer a la **Dra. Klavdia Oleshcko Lutova** y al **M.C. Manuel Toledano Ayala** por sus consejos, comentarios y tiempo dedicado en la revisión del presente trabajo durante los seminarios.

Al **Dr. Gilberto Herrera Ruiz** por su apoyo y las oportunidades brindadas desde mi ingreso a mi Universidad. Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) por el financiamiento brindado para la realización de mis estudios de maestría. Al **Fondo de Financiamiento de la Facultad de Ingeniería**, por el apoyo brindado a este proyecto.

A mis amigos **Juan José Juárez Subias, Carla Belinda Cárdenas Jiménez, José Omar Valencia, Alejandra Angulo Duplán, José González Nieves, Verónica de los Ángeles Jiménez Villalobos y Juvenal Rodríguez Reséndiz** por la amistad brindada y su apoyo incondicional no solo durante esta etapa de mi vida, sino en el tiempo que llevo de conocerlos, ha sido un placer contar con su amistad.

A mis **compañeros de generación** en la maestría, por las experiencias compartidas, por la amistad brindada y por sus valiosos comentarios y observaciones hacia mi trabajo durante los seminarios.

A **Carlos Maurino Méndez Loyola y Rafael Guadalupe Chávez Moreno** por su entusiasta participación en la realización del presente trabajo. A la **Universidad Autónoma de Querétaro** que en todo este tiempo de mis estudios universitarios ha sido un segundo hogar para mí.

No es fácil llegar, se necesita ahínco, lucha y deseo, pero sobre todo apoyo como el que he recibido durante este tiempo, he llegado al final de este camino y en mí han quedado marcadas huellas profundas de éste recorrido. Son madre tu mirada y tu aliento. Son familia su respaldo en mis decisiones. Son maestros sus palabras y sabios consejos. Son amigos, su apoyo y confianza. Mi triunfo también es de todos ustedes.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL	VI
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DESARROLLO SUSTENTABLE Y ENERGÍA	1
1.2. ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO	4
1.2.1. SECTOR ENERGÉTICO Y CAMBIO CLIMÁTICO	5
1.3. ADMINISTRACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS	7
1.4. AMBIENTE INTERIOR Y SU INFLUENCIA SOBRE EL SER HUMANO	8
1.5. OPTIMIZANDO EL USO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE ILUMINACIÓN	9
1.5.1. CONOCER LAS NECESIDADES DE ILUMINACIÓN	9
1.5.2. MAXIMIZA LA EFICIENCIA	9
1.5.3. CONTROL AUTOMÁTICO	9
1.6. OBJETIVO GENERAL	11
1.7. HIPÓTESIS GENERAL	11
1.8. OBJETIVOS PARTICULARES	11
1.9. HIPÓTESIS PARTICULARES	11
1.10. CONJETURAS	12
1.11. JUSTIFICACIÓN	12
1.12. PANORAMA GENERAL DE LA TESIS	16
1.13. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	20
CAPÍTULO 2	21
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	21
2.1. NATURALEZA DE LA LUZ	21
2.1.1. TEORÍA CORPUSCULAR	21
2.1.2. TEORÍA ONDULATORIA	21
2.1.3. TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA	22
2.1.4. TEORÍA DE LOS CUANTOS	22
2.1.5. NATURALEZA DUAL DE LA LUZ	23
2.2. VISIÓN	23
2.2.1. SENSIBILIDAD VISUAL	24
2.2.2. AGUDEZA VISUAL	25
2.2.3. CAMPO VISUAL	25

2.3.	CONCEPTOS DE ILUMINACIÓN	25
2.3.1.	FLUJO LUMINOSO	25
2.3.2.	EFICACIA LUMINOSA	26
2.3.3.	LUMINANCIA (ILUMINACIÓN).....	26
2.4.	CONFORT VISUAL	27
2.4.1.	ATRIBUTOS CONSIDERABLES EN AMBIENTES LUMÍNICOS	28
2.4.2.	PREFERENCIAS SOBRE ATRIBUTOS DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN	34
2.5.	CONCEPTO DE SISTEMAS INTELIGENTES.....	35
2.6.	DEFINICIÓN DE EI.....	36
2.7.	SISTEMA DE ILUMINACIÓN PARA EI'S	38
2.7.1.	INTERFAZ DE CONTROL	41
2.8.	TÉCNICAS DE CONTROL PARA LA CREACIÓN DE AMBIENTES LUMÍNICOS ARTIFICIALES	44
2.8.1.	ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA CAPTURAR Y APROVECHAR LA ILUMINACIÓN NATURAL	44
2.9.	CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA	44
2.9.1.	CONJUNTOS DIFUSOS Y LÓGICA DIFUSA.....	45
2.9.2.	CONCEPTOS BÁSICOS.....	45
2.9.3.	SISTEMAS DE CONTROL BASADOS EN LÓGICA DIFUSA	47
2.9.4.	ÉTAPAS PARA EL DESARROLLO DEL CONTROLADOR DIFUSO	48
CAPÍTULO 3		53
3. MATERIALES Y MÉTODOS		53
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO	53
3.2.	MODIFICACIONES REALIZADAS AL SISTEMA DE ALUMBRADO	54
3.2.1.	RENOVANDO LUMINARIAS	55
3.2.2.	RENOVANDO BALASTROS	57
3.3.	CUANTIFICANDO NIVELES DE ILUMINACIÓN	57
3.3.1.	LUXÓMETRO PORTÁTIL HI 97500	58
3.3.2.	SENSOR DE LUZ AMBIENTE EMPLEADO	58
3.4.	SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE VARIABLES LUMÍNICAS.....	60
3.4.1.	INTERFAZ CON LA PC	62
3.4.2.	COMUNICACIÓN INALÁMBRICA	63
3.4.3.	PROCESO DE COMUNICACIÓN.....	64
3.5.	SISTEMA DE ILUMINACIÓN REGULABLE BASADO EN LÓGICA DIFUSA.....	65
3.6.	CUANTIFICANDO EL AHORRO ENERGÉTICO.....	66
3.6.1.	CONSUMO EN OPERACIÓN CONVENCIONAL	66
3.6.2.	CONSUMO CON CONTROL HORARIO (ENCENDIDO-APAGADO AUTOMÁTICO)	67
3.6.3.	CONSUMO CON CONTROL DE INTENSIDAD REGULABLE AUTOMÁTICO	68
CAPÍTULO 4		69
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		69
4.1.	MONITORIZACIÓN LUMÍNICA.....	69
4.2.	APORTACIÓN LUMÍNICA DE LAS LÁMPARAS	69
4.2.1.	APORTACIÓN LUMÍNICA DE LA LUZ NATURAL	70
4.3.	CALIBRACIÓN DEL CONTROLADOR BASADO EN LÓGICA DIFUSA.....	72

4.4. RESPUESTA DEL SISTEMA AUTOMÁTICO REGULABLE BASADO EN LÓGICA DIFUSA	74
4.5. EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN PROPUESTOS	75
4.6. DISCUSIÓN	83
4.7. CONCLUSIONES	83
4.8. TRABAJOS FUTUROS	84
REFERENCIAS.....	86
A. APÉNDICE.....	93
A.1. ABREVIATURAS EMPLEADAS.....	93
A.2. NIVELES DE ILUMINACIÓN PARA EDIFICIOS EDUCATIVOS RECOMENDADOS POR LA NORMA UNE-EN 12464	95
A.2. ESPECIFICACIONES DEL LUXÓMETRO EMPLEADO	96
A.3. REGLAS DE INFERENCIAS PARA EL CONTROLADOR DIFUSO PROPUESTO	97
A.4. CAPTURAS DE PANTALLA DE LA INTERFAZ DEL SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES LUMÍNICAS	98
A.5. LISTADO DEL MICROCONTROLADOR PIC CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO PROPUESTO	99
A.6 LISTADO EN MATLAB PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN REGULABLE BASADO EN LÓGICA DIFUSA	108
ANEXOS	111
ANEXO 1. RECONOCIMIENTOS OBTENIDOS.	111
ANEXO 2. PUBLICACIÓN ACEPTADA EN LA REVISTA INTERNATIONAL REVIEW OF AUTOMATIC CONTROL (I.RE.A.CO.)	115

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1.1. Volumen de emisiones globales de CO ₂ de las principales 14 naciones (billones de toneladas) (Omer, 2008).	3
1.2. Fuentes emisoras de CO ₂ en México.	6
1.3. Desglose de las fuentes generadoras de CO ₂ en el sector energético en México.	7
1.4. Comparación del desempeño para varias opciones de actualización.	10
1.5. Facturación por concepto de consumo de energía eléctrica de las diferentes entidades académicas de la UAQ registrados durante el año 2005 (Fuente: dirección de obras y mantenimiento de la UAQ).	13
1.6. Historial de consumo de energía eléctrica del transformador que abastece de energía a la Facultad de Ingeniería de la UAQ del período correspondiente al año 2008 (Fuente: dirección de obras y mantenimiento de la UAQ).	14
2.1. Márgenes de reflectancia para superficies interiores (fuente: norma UNE-EN 12464).	31
2.2. Uniformidades y relación entre iluminancias de áreas circundantes inmediatas al área de tarea.	32
2.3. Indicadores de inteligencia para los sistemas de iluminación para EI's (Wong, et al., 2008).	42
3.1. Comparativa de las luminarias actuales (F96T12/D) contra las luminarias propuestas (F32T8/TL84).	55
3.2. Comparativa entre los balastros utilizados.	57
4.1. Comparativa de los sistemas de iluminación evaluados.	77
4.2. Luminarias disponibles para la presente aplicación.	78
4.3. Consumo eléctrico semanal debido a los modelos de luminarias sugeridos.	79
4.4. Consumo eléctrico anual por salón debido a los distintos tipos de lámparas propuestos.	80

4.5. Consumo eléctrico anual debido a los distintos tipos de lámparas propuestos al implementarlo en 27 salones de clase.	82
4.6. Impacto ecológico anual debido a 27 salones de clases.	83
A.1. Niveles de iluminación interiores recomendados para edificios educativos.	95
A.2. Especificaciones del luxómetro portátil HI 97500.	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1. Esquema de los tres pilares del desarrollo sustentable o sostenible.....	1
1.2. Población y demanda de energía mundial anual y estimada (Omer, 2008). Millones de barriles por día de petróleo equivalente (MBDPE).	2
1.3. Generación bruta de energía eléctrica en el sector eléctrico nacional.....	5
1.4. Precio medio de la energía eléctrica en México (Secretaría de Energía, México).	6
1.5. Facturación por concepto de consumo de energía eléctrica desglosada por concepto de cargo por energía (CE), cargo por demanda (CD), cargo por factor de potencia (CFP), impuesto al valor agregado (IVA) y un cargo adicional de un 8% por concepto a derecho de alumbrado público (DAP) correspondientes a la FI de la UAQ durante el año 2008 (Fuente: dirección de obras y mantenimiento de la UAQ).	15
1.6. Mapa mental general.	17
1.7. Mapa mental con imágenes.	18
1.8. Mapa mental matemático.	19
2.1. Espectro electromagnético.	23
2.2. Curva espectral de la eficiencia luminosa para la visión fotópica $V(\lambda)$	24
2.3. Iluminancia o iluminación.	26
2.4. Nivel de preferencias sobre atributos de un sistema de iluminación.	35
2.5. Taxonomía de los principales atributos inteligentes en un sistema inteligente (Bien, et al., 2002).	36
2.6. Principales sistemas de control en un EI típico.	37
2.7. Taxonomía de las prestaciones que ofrece un edificio.	38
2.8. Compensación de la luz natural por la luz artificial.	40
2.9. Componentes del sistema de control de iluminación regulable automático.	41
2.10. Topología de conexión en un sistema de iluminación basado en balastros regulables analógicos.	43

2.11. Topología de conexión en un sistema de iluminación basado en balastos regulables con interfaz de comunicación DALI.....	43
2.12. Ejemplo de un conjunto difuso <i>A</i>	46
2.13. Fusificación de la variable <i>x</i> en los conjuntos difusos Bajo, Medio y Alto.	48
2.14. Fusificadores a emplear a) fusificador triangular, b) fusificador trapezoidal.	49
2.15. Resultado de una máquina de inferencias.	51
2.16. Topología de un controlador de lógica difusa en lazo cerrado.	52
3.1. a) Edificio sujeto a experimentación. b) Vista de planta del edificio (Ríos-Moreno, et al., 2007).....	53
3.2 . Ubicación de los sensores de luz ambiente.....	54
3.3. Modificación realizada al sistema de alumbrado del edificio.	55
3.4. Sensibilidad espectral relativa de un foto-detector estándar de silicio y el sensor SFH 5711 comparados con el ojo humano ($V(\lambda)$) (Osram, 2006).	58
3.5. Un detector de salida lineal (izquierda) y uno de salida logarítmica (derecha) son empleados para detectar la iluminación ambiente. Para alcanzar una resolución suficiente sobre el rango de medición, el rango operativo del detector lineal es ajustado utilizando distintas resistencias (Osram, 2006).....	59
3.6. Ubicación de los sensores. a) Muestra la distribución de los sensores ubicados en el área de trabajo al interior del edificio (sensores del 1 al 12). b) Muestra el sensor número 13 colocado en el interior (ubicado en el techo del salón), así como también el sensor ubicado en el exterior del salón.	60
3.7. Sistema para la monitorización de los niveles lumínicos de interés.	62
3.8. Instalación del sistema de monitorización lumínica.	64
3.9. Ventana principal de la interfaz de usuario del sistema de monitorización.	65
3.10. Representación del filtro basado en lógica difusa del regulador propuesto.	66

4.1. Iluminación del salón 21 con ausencia de luz natural, lámparas encendidas, persianas y puerta cerradas.	69
4.2. Mediciones hechas el 1 de mayo de 2008. a) Niveles observados al exterior del edificio. b) Niveles observados al interior del edificio.	70
4.3. Niveles de iluminación promedio al interior del edificio y la zona de confort visual que establece la norma IEC-12464.	71
4.4. Conjuntos difusos para la iluminación interna.	72
4.5. Conjuntos difusos para la iluminación externa.	73
4.6. Conjuntos difusos para la activación de los balastros.	73
4.7. Superficie de control que mapea la iluminación interna (Eint) y la externa (Eext) con un porcentaje de activación de las luminarias.	74
4.8. Respuesta del controlador regulable observada a lo largo de un día normal de clases (8:00 a 22:00 hrs).	75
4.9. Consumo eléctrico observado en el consumo convencional.	76
4.10. Consumo eléctrico con el control horario.	76
4.11. Consumo eléctrico con el control difuso.	77
4.12. Zonificación de la FI de la UAQ. Los edificios marcados con ** son salones de clase con características similares al salón de pruebas.	81
A.1. Capturas de pantalla de la interfaz del sistema de monitoreo de variables lumínicas. a) Niveles de iluminación visualizados mediante gráficas de barras. b) Niveles de iluminación visualizados mediante graficas de líneas.	98

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Desarrollo sustentable y energía

Desarrollo humano y desarrollo sustentable han sido dos términos ampliamente utilizados en las pasadas 2 décadas (Dunn, 2002; Kamel, et al., 2005; Midilli, et al., 2006; Tippet, et al., 2007; Costantini, et al., 2008; Erdogdu, 2009), de acuerdo al Forum for the Future (2009), una definición de desarrollo sustentable es la siguiente:

“Un proceso dinámico el cual permite a las personas darse cuenta de su potencial y mejorar su calidad de vida, de forma tal que simultáneamente mejore y proteja la calidad de vida en el planeta”.

Un desarrollo sustentable (ver Figura 1.1) es aquel considera 3 factores principales: económico, ecológico y social (Pfeiffer, et al., 2005).

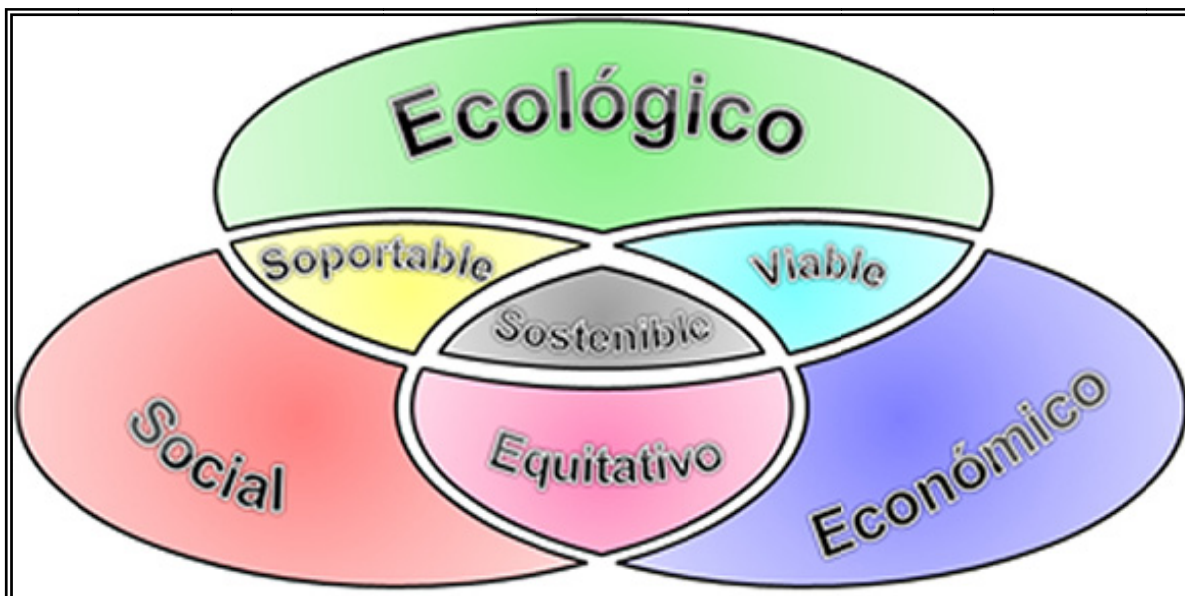


Figura 1.1. Esquema de los tres pilares del desarrollo sustentable o sostenible.

El ahorro de energía y el medio ambiente son temas es de primordial importancia que en años recientes han tomado interés público en una búsqueda de un desarrollo sustentable (Kelly, 2006; Midilli, et al., 2006; Omer, 2008; Langnysz, et al., 2009; Ouyang, et al., 2009). En las últimas décadas debido al estilo de vida moderno y al crecimiento poblacional, la demanda de energéticos ha experimentado un incremento exponencial (Lew, 2000; Voorspools, 2004; Omer, 2008). De seguir esta tendencia es posible que por un lado que la demanda sobrepase la capacidad de abastecimiento (ver Figura 1.2), mientras que por otro lado, se vislumbra el daño ecológico ocasionado al extraer y generar recursos energéticos (a partir de combustibles fósiles), con lo cual se producen anualmente millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global (di Stefano, 2000; Lew, 2000; Bergmann, et al., 2006; Muller-Furstenberger, et al., 2007; Omer, 2008).

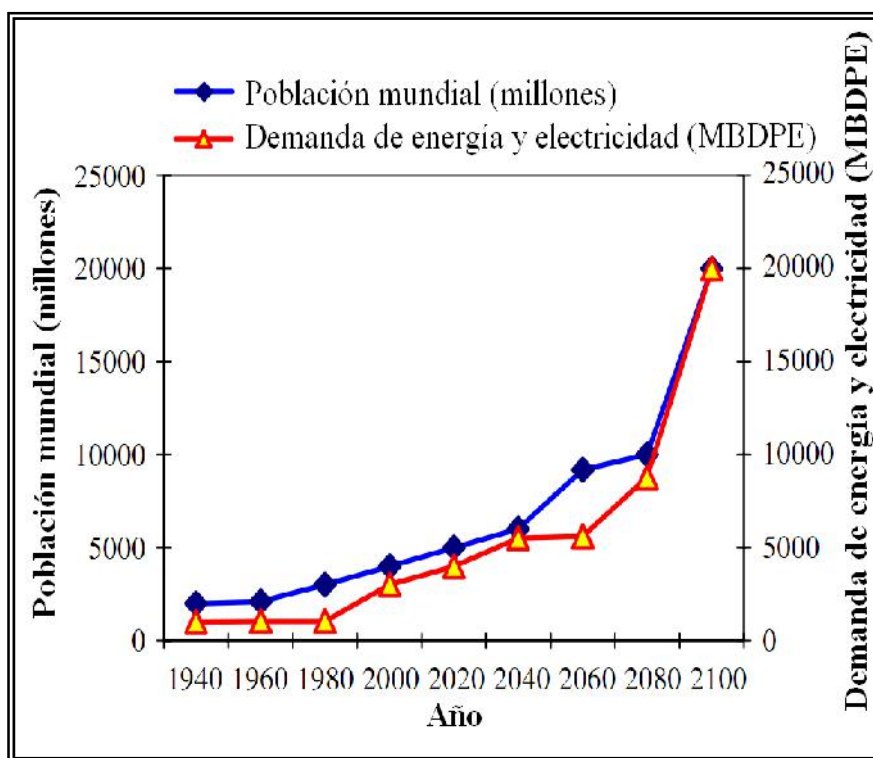


Figura 1.2. Población y demanda de energía mundial anual y estimada (Omer, 2008). Millones de barriles por día de petróleo equivalente (MBDPE).

Actualmente, un 80% de la demanda de energía a nivel mundial es cubierta por combustibles fósiles (Muller-Furstenberger, et al., 2007), las principales naciones que contribuyen con emisiones de gases de efecto invernadero se muestran en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Volumen de emisiones globales de CO₂ de las principales 14 naciones (billones de toneladas) (Omer, 2008).

Rango	Nación	CO ₂	Rango	Nación	CO ₂	Rango	Nación	CO ₂
1	Estados Unidos	1.36	6	India	0.19	11	México	0.09
2	Rusia	0.98	7	Reino Unido	0.16	12	Polonia	0.08
3	China	0.69	8	Canadá	0.11	13	Sudáfrica	0.08
4	Japón	0.30	9	Italia	0.11	14	Corea del sur	0.07

Los hidrocarburos son una fuente de energía no renovable, por esta razón hay dos problemáticas principales en el uso de estos recursos: (1) la sustentabilidad; (2) la responsabilidad por cubrir las demandas de petróleo a nivel mundial (Esmaeili, et al., 2009). Expertos aseguran que la mitad de las reservas de combustibles fósiles con las que cuenta el mundo habrán sido consumidas en un 50% para el 2015 (Campbell, 2003), es decir, después de esta fecha solo restará por extraer la mitad de reservas que son más inaccesibles, aumentando de esta manera los costos de extracción y generación de esta clase de recursos.

Como una posible solución ante esta problemáticas, surge la necesidad de utilizar fuentes de energía alternativas a las basadas en combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural, etc.), como una solución para cubrir las crecientes demandas de energéticos y al mismo tiempo disminuir el daño ecológico. Es aquí donde surge el concepto de energía verde o limpia, la cual se define como aquella que se acompaña por un mínimo o nulo daño ecológico. Sin embargo, tales fuentes alternativas tienen un lento crecimiento, al grado que para el 2050 se

prevé que el consumo de combustibles fósiles y energías verdes sean de 13807.2 y 2694.9 Mtoe¹ respectivamente (Midilli, et al., 2006).

Otra posible solución ante esta problemática que amenaza la sustentabilidad de la población mundial consiste en estabilizar o disminuir la demanda de energéticos, al impulsar el desarrollo de tecnologías que permitan aumentar la eficiencia en el consumo de energía (Voorspools, 2004; Ürge-Vorsatz, et al., 2007; Hinnells, 2008; Wu, et al., 2008). De esta manera alrededor del mundo en varios países las campañas gubernamentales orientadas al ahorro de energía eléctrica, buscan precisamente promover la renovación de los sistemas de iluminación con dispositivos eléctricos que presentan una mayor eficiencia energética (Mills, et al., 2002).

1.2. Energía eléctrica en México

Hoy en día la energía eléctrica generada en México proviene de dos tipos de productores, por un lado se tiene la generada por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), integrado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Luz y Fuerza del Centro (LFC); por otro lado, se tienen a los Productores Independientes de Energía (PIE) quienes le venden la energía eléctrica que generan al SEN para ser distribuida.

De acuerdo al Sistema de Información Energética (SIE), los PIE iniciaron su participación en el sector energético a partir del año 2000 y su presencia se ha fortalecido desde su aparición hasta el día de hoy, al generar en el 2008 74232 GWh de energía, lo cual represento un 31.7% del total de energía generada en el sector eléctrico nacional (ver Figura 1.3).

¹ “toe” es el símbolo para representar tonelada de petróleo equivalente, la cual es una unidad utilizada en la industria internacional de energía. 1 toe corresponde a la energía generada a partir de una tonelada de petróleo, lo cual es equivalente a 10^7 kilocalorías, 7.4 barriles de petróleo, 1270 m³ de gas natural, 1.4 toneladas de carbón, 41.868 GJ, 39.683 millones de Btu ó 11.630 mega watt hora (MWh).

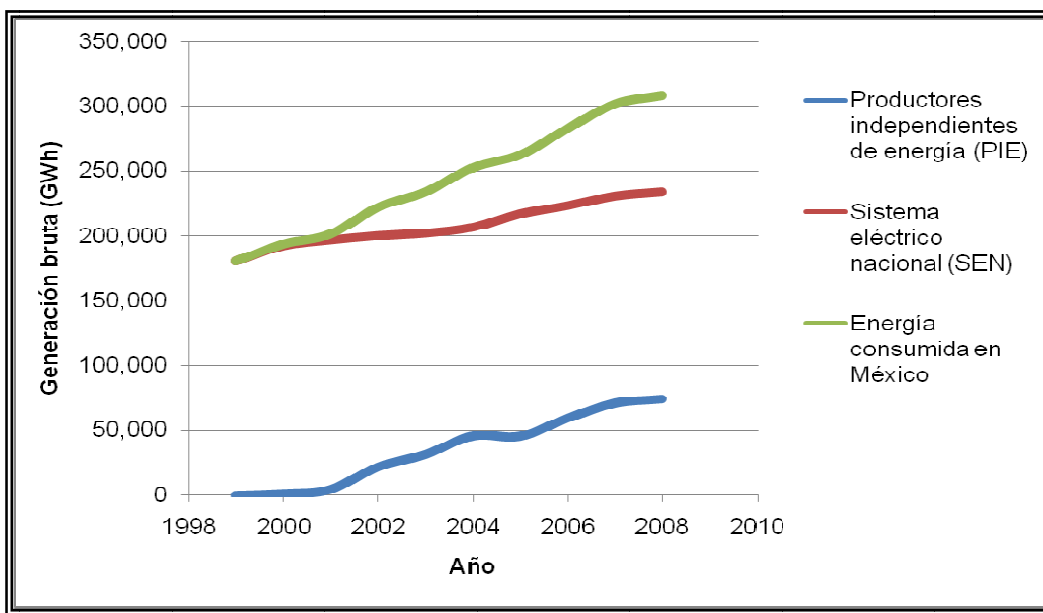


Figura 1.3. Generación bruta de energía eléctrica en el sector eléctrico nacional.

1.2.1. Sector energético y cambio climático

De acuerdo a un análisis realizado recientemente por el periódico Reforma (Vela, et al., 2006), el gobierno foxista heredó a los mexicanos el mayor encarecimiento que ha tenido la electricidad en un sexenio. En tal artículo se plantea que; con este incremento en el costo de energía eléctrica, se obliga a las empresas a buscar alternativas de ahorro energético, como por ejemplo generar energía propia mediante el uso de plantas de emergencia, con esta opción se estima que se puedan ahorrar de un 20 a un 30 por ciento en el costo de la energía que consumen.

De acuerdo a la Secretaría de Energía, en México el precio medio de la energía eléctrica se ha incrementado considerablemente en los últimos años (ver Figura 1.4), aumentando en promedio un 240% del año 1999 al 2008.

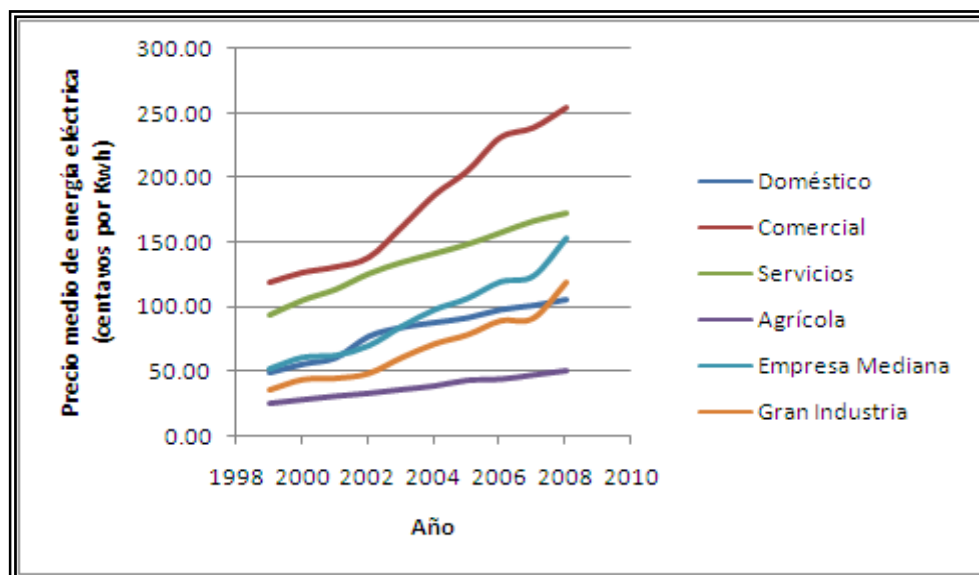


Figura 1.4. Precio medio de la energía eléctrica en México (Secretaría de Energía, México).

En México, en el eje 4 del Plan de Desarrollo Nacional (PND) 2007 - 2012, se habla del cambio climático global debido al aumento en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Según datos mostrados en el PND 2007-2012, actualmente en México el 64% de la electricidad generada se basa en la utilización de hidrocarburos como fuente primaria, esto contribuye a que nuestro país se encuentre posicionado dentro de los 15 principales países generadores de GEI, al emitir a la atmósfera en el 2002 643,183 millones de toneladas de CO₂, lo que representa una contribución del 1.5% de las emisiones globales de estos gases. En lo que respecta a las fuentes responsables de tales emisiones, como podemos ver en el Cuadro 1.2 el sector energético es el que contribuye de manera significativa en la producción de esta clase de gases.

Cuadro 1.2. Fuentes emisoras de CO₂ en México.

Fuente emisora de CO ₂	Aportación al total de las emisiones de GEI en México
Sector energético	61%
Procesos industriales	7%
Uso de suelo (deforestación)	14%
Agricultura	8%
Descomposición de residuos orgánicos	10%
<i>Fuente: Plan de Desarrollo Nacional 2007 – 2012, México</i>	

Dentro del sector energético en particular, la generación de electricidad y el transporte contribuyen significativamente en la generación de GEI (ver Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Desglose de las fuentes generadoras de CO₂ en el sector energético en México.

Fuente emisora de CO₂	Aportación al total de las emisiones de GEI en México
Generación de electricidad	24%
Uso de combustibles fósiles en el sector manufacturero e industria de la construcción	8%
Transporte	18%
Sectores comercial, residencial y agrícola	5%
Otros	5%
<i>Fuente: Plan de Desarrollo Nacional 2007 – 2012, México</i>	

1.3. Administración de la energía eléctrica en edificios

A escala global, los edificios son responsables de aproximadamente un 40% del consumo de energía eléctrica anual (Omer, 2008), la mayor parte de ésta es empleada para proveer de iluminación, calefacción, enfriamiento y ventilación. Tomando en cuenta esto, a principio de la década de los 80's nace el concepto de edificio inteligente (EI), el cual puede definirse como el conjunto de software y hardware orientados a administrar los recursos energéticos al interior del edificio de manera eficiente (Wong, et al., 2005), con el cual se busca administrar los recursos de manera eficiente; por ejemplo, al aprovechar la iluminación natural al interior, automatizando la entrada en operación del alumbrado (Doulos, et al., 2008) ó de los sistemas de aire acondicionado y ventilación (HVAC) (Kolokotsa, et al., 2005). Al mismo tiempo que un EI administra eficientemente los recursos energéticos, busca brindar ambientes confortables de trabajo al interior del edificio, promoviendo de esta manera la productividad (Krüger, et al., 2004; Osterhaus,

2005; Galasiu, et al., 2006; Kolokotsa, et al., 2006; Lee, et al., 2007; Cheung, et al., 2008), mediante la creación de ambientes controlados que ofrezcan entorno confortable con lo cual se favorezca la productividad (Yener, 1999; Leslie, 2003; Fernández de Torres, et al., 2004; Osterhaus, 2005; Morghen, et al., 2009).

1.4. Ambiente interior y su influencia sobre el ser humano

Recientemente se ha visto la relación entre el ambiente interior de los edificios y los humanos como una compleja interacción entre los ocupantes del edificio y un arreglo de factores físicos, químicos, biológicos y de diseño (Mitchell, et al., 2007).

La iluminación es uno de los factores más importantes en nuestra interacción con el entorno, es indispensable para la función visual, para la regulación neuroendocrina y es esencial para nuestra percepción emocional y evaluación del entorno (Morghen, et al., 2009).

Estudios biomédicos de los últimos 50 años muestran que la iluminación tiene efecto sobre la salud del hombre (Fernández de Torres, et al., 2004). Se ha observado que la luz (incluida la artificial) tiene un rango de efectos sobre la fisiología y comportamiento humano, por ejemplo, al afectar el sistema nervioso central y regular los ritmo circadiano² (Jasser, et al., 2006; Mills, et al., 2007; Stevens, et al., 2007), trastornos en este ciclo o ritmo biológico pueden traer como resultado calidad de sueño baja (Wehr, et al., 1995), falta de estado de alerta (Lack, et al., 1993), depresión periódica (Lewy, et al., 1982) y un incremento en el mal humor (Blask, et al., 1999).

² Los ritmos circadianos son oscilaciones biológicas de las variaciones de una función en un periodo de aproximadamente 24 horas (López Cuellar, et al., 2006).

1.5. Optimizando el uso de energía eléctrica en sistemas de iluminación

El uso de luz natural en edificios es la mejor estrategia para optimizar la eficiencia energética en cuanto a sistemas de iluminación se refiere (Mansy, 2004). Para realizar un uso óptimo de la energía eléctrica consumida por sistemas de iluminación, se sugiere considerar las siguientes estrategias:

1.5.1. Conocer las necesidades de iluminación

Antes de hacer una actualización del sistema de iluminación, es necesario, saber cuáles son las necesidades de iluminación que se requieren, existen estándares que se encargan de regular esto, estableciendo los niveles necesarios de iluminación para realizar de manera normal ciertas actividades. Como muestra de lo anterior, en el Cuadro A.1 se muestran los niveles de iluminación recomendados para ciertas actividades en edificios educativos.

1.5.2. Maximiza la eficiencia

Como ya se había mencionado, existen en el mercado distintos tipos de tecnologías tanto de balastos, como de luminarias fluorescentes con eficiencias distintas y obviamente con costos distintos, dependiendo de la cantidad de horas de uso al año de las luminarias, es posible seleccionar la luminaria que nos ofrezca la mayor eficiencia, a un costo razonable.

1.5.3. Control automático

Dependiendo del uso del sistema de iluminación, para lograr una mayor eficiencia energética, podrá implementarse cierto grado de automatización, esto para evitar desperdicio de energía eléctrica generados por un mal uso del sistema por ejemplo, mediante el uso de sensores de presencia, se evita que las luminarias se encuentren activadas cuando no se encuentra utilizado el edificio.

Es muy importante realizar un análisis completo de las necesidades y características requeridas del sistema, para que la actualización del sistema presente el mejor desempeño a un costo justificable (ver Cuadro 1.4).

Cuadro 1.4. Comparación del desempeño para varias opciones de actualización.

	Caso base: Lámparas T12 con balastro magnético Caso 1	Lámparas ahorradoras de energía T12 Caso 2	Lámparas T8, balastro electrónico Caso 3	Lámparas T8, balastro electrónico, reflector especular Lo mismo que el caso 4, + sensores de presencia Caso 5	Lo mismo que el caso 5, + mantenimiento Caso 6
Pies candelas promedio (fc)	28	25	30	27	27
Vatios de entrada (w)	184	156.4	120	60	50
Potencia total (kw)	2.208	1.877	1.440	0.720	0.600
Energía anual utilizada (kwh)	8,832	7,507	5,706	2,880	1,500
Costos					
Ahorros de energía (%)	N/A	15	35	67	83
Costo de operación anual (US\$)	833.70	750.74	576.00	288.00	177.00
Costo de actualización (US\$)	N/A	312	1,440	1,620	1,970
Ahorros					
Ahorros de energía (%)	N/A	15	35	67	83
Ahorros en costo de operación (%)	N/A	15	35	67	80
Tasa de retorno de inversión (años)	N/A	2.4	4.7	2.7	2.8
Tasa interna de retorno(10-años)	N/A	41%	17%	35%	34%
* Delamping es simplemente el hecho de remover una o más lámparas de una luminaria, esto cuando el nivel de iluminación provisto por la misma excede las necesidades del lugar donde fue instalada.					
Fuente: Adaptado de Fuente E, Lighting Technology Atlas, Tabla 3.1					

Considerando lo mencionado hasta el momento, el objetivo del presente trabajo de investigación es el evaluar el potencial de ahorro energético que presenta un sistema de iluminación automático regulable basado en lógica difusa, implementado en un salón de clases de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).

1.6. Objetivo general

Desarrollar un sistema de iluminación automático para edificios inteligentes, del cual no sólo se derive el ahorro potencial de energía eléctrica en los salones de clase, sino que también se asegure un confort visual.

1.7. Hipótesis general

Al regular la potencia de las luminarias en los salones de clase de manera automática, se alcanza un uso racional de la energía eléctrica, al mismo tiempo, que se asegura un confort visual mediante el ambiente con iluminación controlada.

1.8. Objetivos particulares

- Determinar las condiciones de iluminación en un salón de referencia.
- Seleccionar algunas técnicas de regulación para crear ambientes de iluminación controlada.
- Lograr un ahorro de energía eléctrica superior al 50% en cuanto a iluminación se refiere, mediante el control de la iluminación.
- Asegurar un confort visual a los usuarios del salón de interés.

1.9. Hipótesis particulares

- El control difuso es una alternativa para optimizar los niveles de iluminación al interior del edificio.
- Existe un desperdicio de energía eléctrica en salones de clase en cuanto a iluminación se refiere.
- Mediante ambientes artificiales de iluminación controlada, se garantiza un confort visual.

1.10. Conjeturas

- El confort visual favorece al rendimiento de los seres humanos.
- Una administración automática de la energía eléctrica elimina los desperdicios energéticos derivados de un mal uso de los mismos.

1.11. Justificación

De acuerdo a la dirección de obras y mantenimiento de la UAQ, la entidad académica que genera anualmente el mayor gasto debido al consumo de energía eléctrica dentro de la universidad, es la Facultad de Ingeniería (ver Cuadro 1.5).

La Facultad de Ingeniería de la UAQ se abastece de energía eléctrica por medio de un transformador que tiene contratada una carga de 440 kW en la tarifa HM de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), dicho transformador también provee de energía a la Facultad de Química y a unas oficinas administrativas. Según la dirección de obras y mantenimiento de la UAQ, el prorrateo establecido para realizar el cobro de energía eléctrica a tales entidades académicas es el siguiente: 50% para la Facultad de Ingeniería; 40% para la Facultad de Química y 10% para las oficinas administrativas, es decir, un 50% del total de la facturación debida al consumo de energía de este transformador se carga a los gastos de la Facultad de Ingeniería.

Cuadro 1.5. Facturación por concepto de consumo de energía eléctrica de las diferentes entidades académicas de la UAQ registrados durante el año 2005 (Fuente: dirección de obras y mantenimiento de la UAQ).

Lugar	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Biblioteca Bernardo Quintana	856	1917	1950	1363	1429	1602	1167	2162	2122	1167	1363	9174
Edificio Octavio S Mondragon		1582	1725	1377	889	1350	884	1033	1357	884	1377	1549
Edificio Octavio S Mondragon	1006	9663	9557	8540	7801	9009	9251	9001	12156	9251	8540	9663
Escuela de bellas Artes Centro	7690	2607	2782	2282	2570	2568	2499	2578	2558	2499	2282	2759
Escuela de Bellas Artes Centro Universitario	4629		4925	5038	5044	5220	4089	5412	6565	4089	5038	4364
Escuela de Medicina Veterinaria Zootecnia	7903		11226	5516	5913	9646	8980	1477	8459	8980	5516	6224
Escuela de Medicina Veterinaria Zootecnia	5437		5993	5065	4858	5519	5428	5060	6164	5428	5065	6776
Facultad de contaduria y Adminitracion	41864		44016	45781	46022	47338	37663	53197	54263	37663	45781	40785
Fac de contaduria y Administracion(Posgrado)	7301		7548	7543	7660	7831	8566	8177	9183	8566	7543	6968
Facultad de Informatica	7920		9771	8442	10353	10026	3890			3890	8442	5285
Facultad de Ingenieria	79250	77521	88755	66923	78747	73919	72186	88337	83586	72186	66923	70045
Facultad de ingenieria Posgrado	5487		6090	6573	7169	6908	6311	7925	8087	6311	6573	5098
Facultad de lenguas y Letras	4898		6041	6043	10672	7864	8451	9219	8245	8451	6043	4936
Facultad de lenguas y Letras (TECALL)	195		5161	4678	5402	5196	3343			3343	4678	2857
Facultad de Medicina	9424	9898	9563	10007	9522	10095	8248	11880	11963	8248	10007	9853
Imprenta	752	731	861	842	896	968	890	1108	988	890	842	785
Preparatoria Norte	15825		16262	14812	14445	12793	10501		19118	10501	14812	10866
Preparatoria Sur	21227	12395	15654	13821	17091	16295	16332	16332	19007	16332	13821	13088
Rebombero General	4902		6316	6717	5505	7793	8537		12495	8537	6717	5958
Unidad Deportiva	8443	8919	11556	9463	11172	10225	10401	10332	856	10401	9463	9596
SUMA EN PESOS	237061	126121	265752	230826	253160	253083	228456	233230	267172	230826	226629	220757

En el Cuadro 1.6 se muestra el historial de consumo del transformador que suministra energía eléctrica a la Facultad de Ingeniería, así como también se desglosa el prorratio correspondiente para dicha Facultad. Como podemos ver, durante el pasado 2008 la Facultad de Ingeniería de la UAQ gasto en promedio al mes la cantidad de \$91662.68 por concepto de energía eléctrica, en esta cifra se considera el cargo por demanda de energía eléctrica, el cargo por demanda y el cargo por factor de potencia (ver Cuadro 1.6).

Cuadro 1.6. Historial de consumo de energía eléctrica del transformador que abastece de energía a la Facultad de Ingeniería de la UAQ del período correspondiente al año 2008 (Fuente: dirección de obras y mantenimiento de la UAQ).

Mes	Demanda facturable total del transformador (kWh)	Consumo total (kWh)	FP (%)	FC (%)	Precio medio (\$/kWh)	Consumo FI	Facturación total FI (\$)
Enero	258	95280	81.4	49	1.4774	47640	70382.13
Febrero	271	110640	84.4	53	1.3845	55320	76590.51
Marzo	303	119460	86.31	55	1.4181	59730	84701.93
Abril	292	106560	83.51	48	1.4492	53280	77215.36
Mayo	311.5	133560	88.28	66	1.61615	66780	93751
Junio	318	132960	87.4	50	1.4272	66480	94973.82
Julio	284	124560	87.35	54	1.4711	62280	91621.29
Agosto	212	103020	83.82	53	1.5213	51510	78360.72
Septiembre	278	128340	87.42	52	1.5819	64170	101510.23
Octubre	294	126960	87.3	54	1.6699	63480	106006.50
Noviembre	296.5	136860	87.59	56	1.682	68430	114134.88
Diciembre	307	127080	86.58	56	1.7349	63540	110703.74
Promedio	285.42	120440	85.95	53.83	1.5361	60220	91662.68

Del total de energía facturada durante el 2008 en la FI, un 60% del cargo es debido al consumo de energía, el resto del importe facturado se debe a multas por demanda de energía, factor de potencia bajo e impuestos (ver Figura 1.5).

Debido al elevado costo de la energía eléctrica en México, es importante buscar alternativas de ahorro energético en la Facultad de Ingeniería en la UAQ, con la renovación de los balastros electromagnéticos actualmente instalados en esta institución por unos electrónicos de intensidad regulable (necesarios para ajustar de manera automática el nivel de iluminación), sin la necesidad de implementar un control regulable que aproveche la luz de día, ya se está obteniendo un ahorro energético, debido a que estos últimos balastros presentan una mayor eficiencia que sus antecesores.

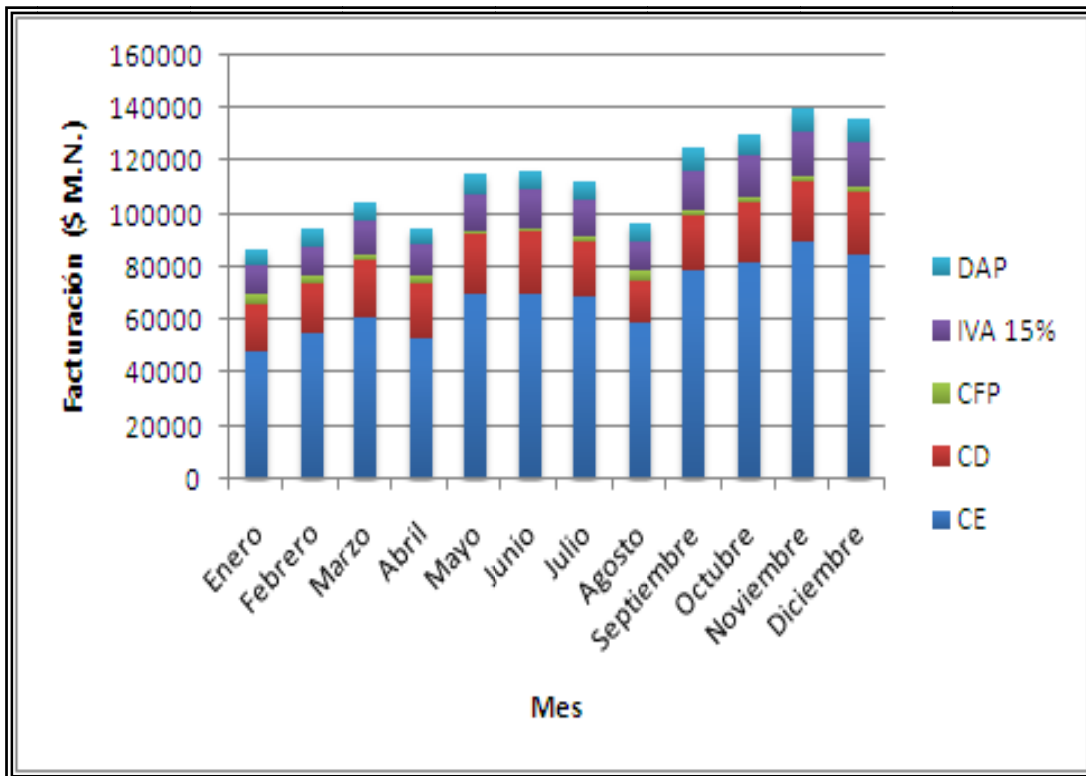


Figura 1.5. Facturación por concepto de consumo de energía eléctrica desglosada por concepto de cargo por energía (CE), cargo por demanda (CD), cargo por factor de potencia (CFP), impuesto al valor agregado (IVA) y un cargo adicional de un 8% por concepto a derecho de alumbrado público (DAP) correspondientes a la FI de la UAQ durante el año 2008 (Fuente: dirección de obras y mantenimiento de la UAQ).

Con el sistema ajustable se aprovecha al máximo la luz natural que entra por las ventanas del edificio, reduciendo con esto considerablemente el consumo de energía eléctrico, además se prolonga la vida de las luminarias, ya que no todo el tiempo trabajan al 100% de su capacidad.

Al disminuir el consumo de energía eléctrica, no sólo se ahorra energía eléctrica, sino que se disminuye la producción de gases de efecto invernadero (responsables del calentamiento global) generados durante la producción de energía eléctrica.

1.12. Panorama general de la tesis

Para facilitar la concepción, desarrollo y revisión del presente trabajo de investigación, como sugerencia de la Dra. Klavdia Oleshcko Lutova al inicio de la presente investigación fueron creados 3 mapas mentales que ofrecen un panorama general de la tesis desarrollada, en ellos se conceptualiza, jerarquiza y delimita el trabajo con diversos elementos tales como conceptos, imágenes, colores y ecuaciones.

El objetivo de estos diagramas es el de conceptualizar claramente el trabajo de tesis, además, para permitirle al lector rápidamente por medio de 3 diagramas tener una visión general sobre la manera en la que fue abordado el trabajo de investigación.

El primer mapa mental (ver Figura 1.6) hace uso de conceptos y elementos visuales para cumplir con su objetivo, el segundo mapa (ver Figura 1.7) utiliza únicamente elementos gráficos y finalmente el tercer mapa (ver Figura 1.8) emplea conceptos matemáticos.

Sin mayor preámbulo y luego de esta descripción de los diagramas desarrollados (ver Figura 1.6 a Figura 1.8), espero que las 3 siguientes figuras brinden al lector de manera rápida un panorama general del presente trabajo de tesis.

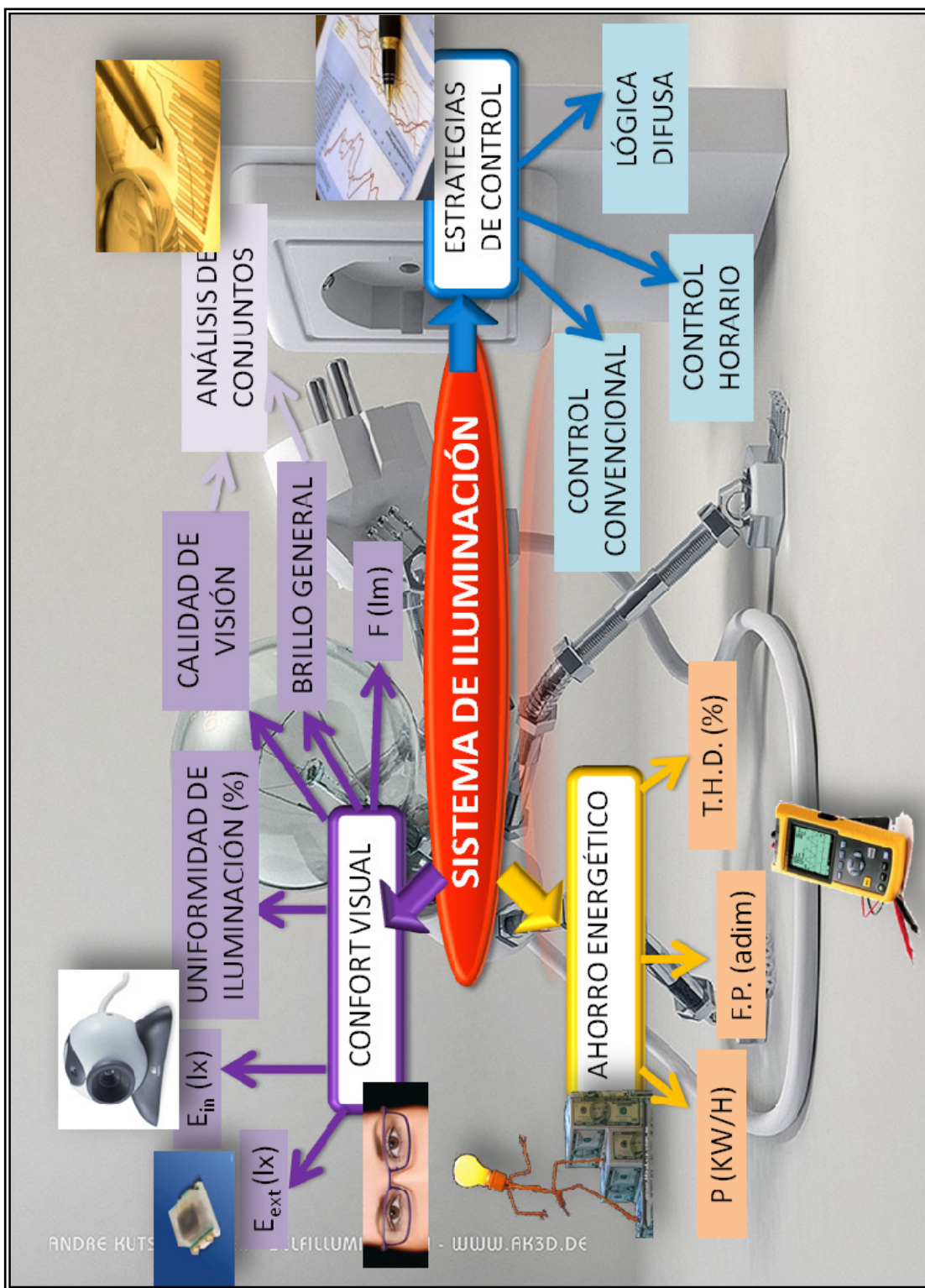


Figura 1.6. Mapa mental general.

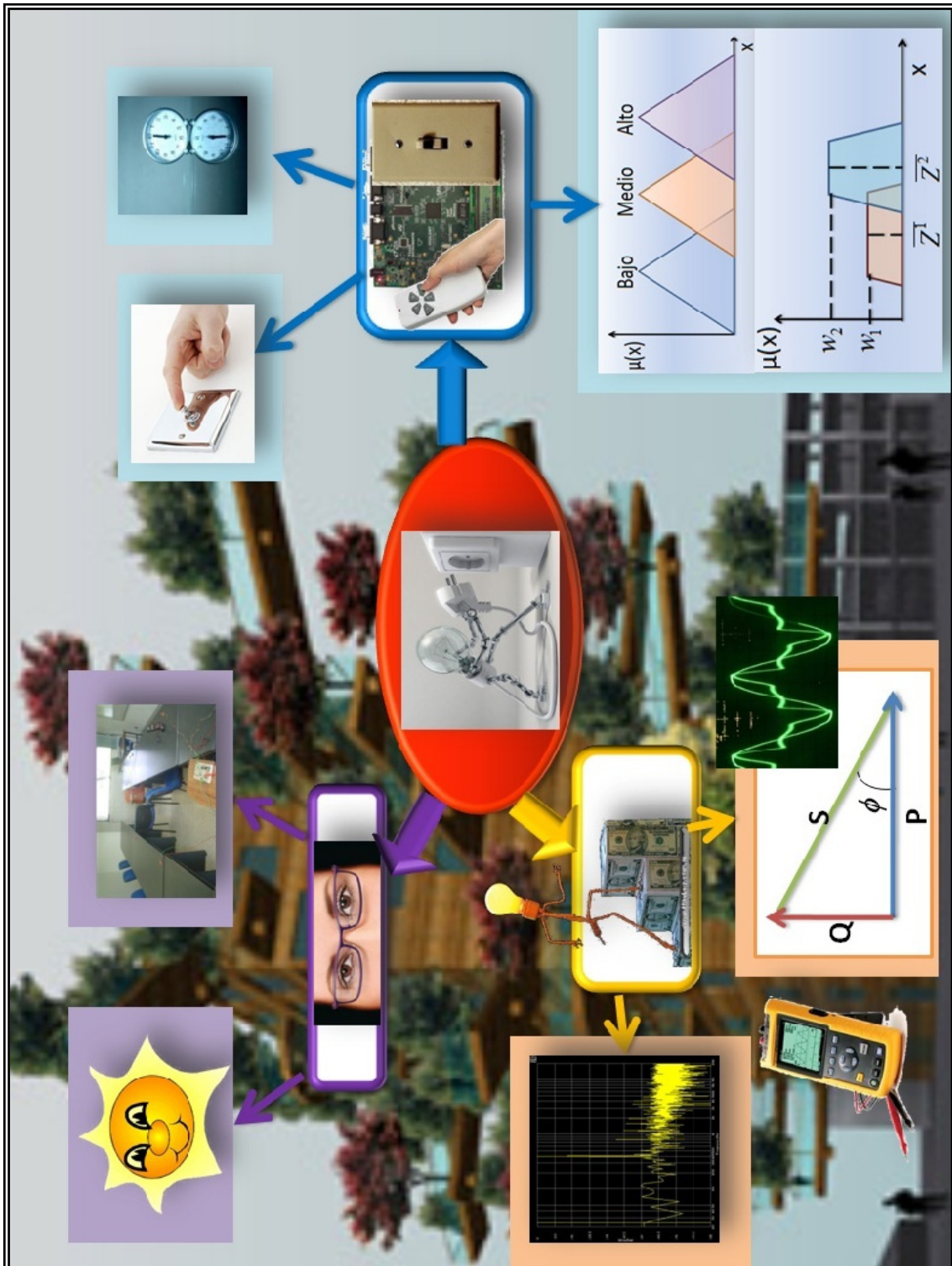


Figura 1.7. Mapa mental con imágenes.

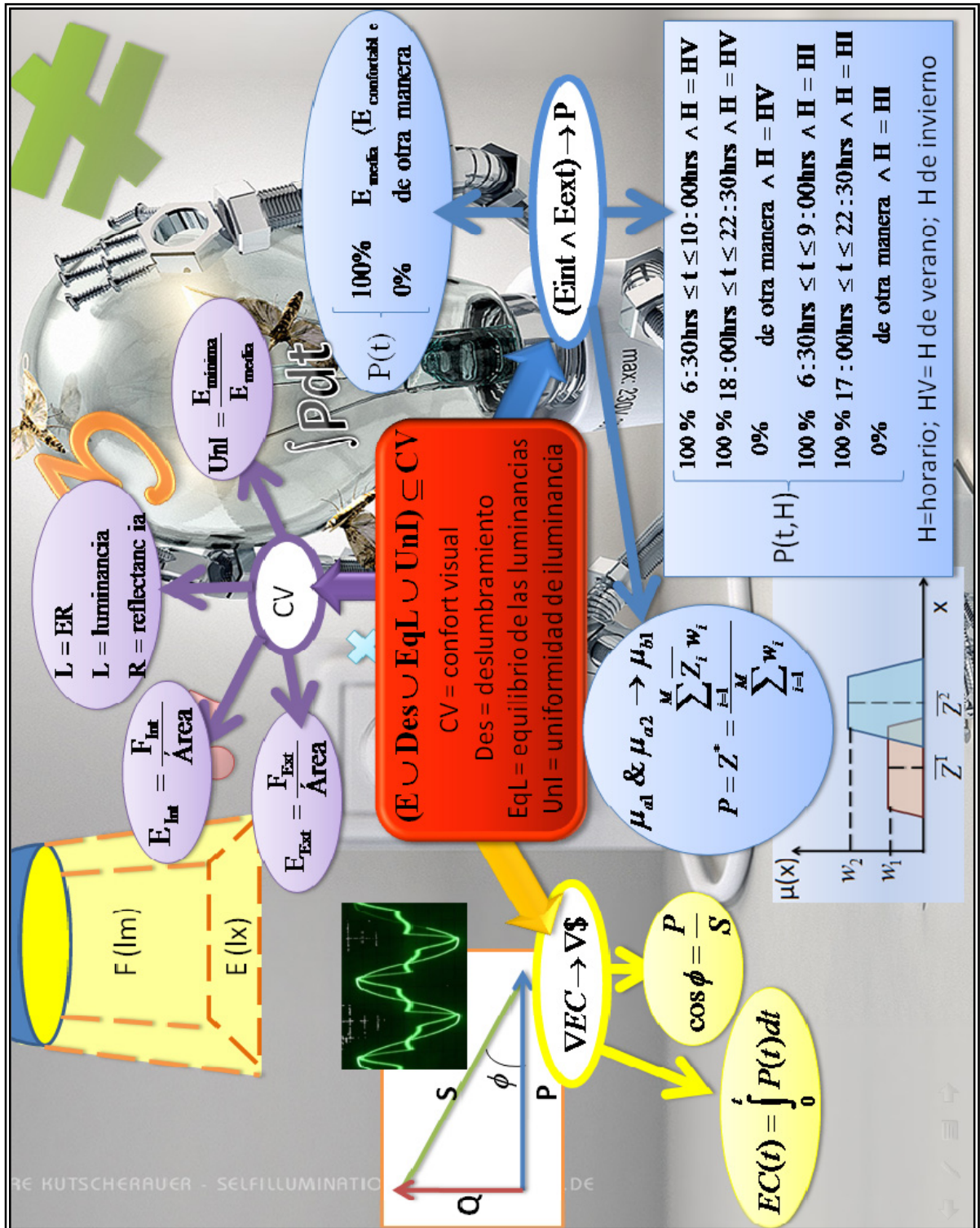


Figura 1.8. Mapa mental matemático.

1.13. Organización de la tesis

El resto de la tesis se encuentra estructurada de la siguiente forma: en el Capítulo 2 se muestran algunas consideraciones teóricas y conceptos básicos que son de utilidad para el entendimiento del trabajo; en el Capítulo 3 es descrita la metodología empleada para el buen desarrollo de la presente tesis, en este capítulo es descrito un sistema de monitoreo de variables lumínicas así como el controlador regulable de iluminación propuesto; el Capítulo 4 muestra los resultados y discusión del trabajo.

Capítulo 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Naturaleza de la luz

La luz es una forma de energía que emiten los cuerpos luminosos y que percibimos mediante el sentido de la vista. Desde la antigüedad los filósofos ya conocían algunos hechos sobre la propagación de la luz, de esta manera se le atribuye a Euclides el descubrimiento de las leyes de reflexión. A mediados del siglo XVI aparecen casi conjuntamente dos teorías acerca de la naturaleza de la luz, estas son la teoría corpuscular (1666) y la teoría ondulatoria (1678).

2.1.1. Teoría corpuscular

Propuesta por Newton, esta teoría supone que la luz está compuesta por una serie de corpúsculos o partículas elementales emitidos por los manantiales luminosos, los cuales se propagan en línea recta y que pueden atravesar medios transparentes, y pueden ser reflejados por materias opacas. Esta teoría explica: La propagación rectilínea de la luz, la refracción y reflexión, sin embargo, esta teoría no explica algunos fenómenos como interferencia y difracción de la luz.

2.1.2. Teoría ondulatoria

Introducida por el científico holandés C. Huygens, esta teoría establece que la luz se propaga mediante ondas mecánicas emitidas por un cuerpo luminoso. Esta teoría explica las leyes de la reflexión y la refracción, define la luz como un movimiento ondulatorio del mismo tipo que el sonido. Como las ondas se transmiten en el vacío, supone que las ondas luminosas necesitan para propagarse un medio ideal, el éter, presente tanto en el vacío como en los cuerpos materiales.

Esta teoría tiene una dificultad fundamental que es precisamente la hipótesis del éter. Tenemos que equiparar las vibraciones luminosas a las vibraciones elásticas transversales de los sólidos, y no transmitiendo por tanto vibraciones longitudinales. Existe, pues, una contradicción en la naturaleza del éter, ya que por un lado debe ser un sólido incompresible y por otro no debe oponer resistencia al movimiento de los cuerpos. (Nota: las ondas transversales solo se propagan en medios sólidos).

2.1.3. Teoría electromagnética

Maxwell en 1865 descubre que la perturbación del campo electromagnético puede propagarse en el espacio a una velocidad que coincide con la de la luz en el vacío, equiparando por tanto las ondas electromagnéticas con las ondas luminosas.

Veinte años después Hertz comprueba que las ondas hertzianas de origen electromagnético tienen las mismas propiedades que las ondas luminosas, estableciendo definitivamente la identidad de ambos fenómenos. Esta teoría no da explicación a:

- Fenómenos por absorción o emisión.
- Fenómenos fotoeléctricos.
- Emisión de luz por cuerpos incandescentes.

Y por lo tanto es necesario volver a la teoría corpuscular, como hizo Planck en 1900.

2.1.4. Teoría de los cuantos

Esta teoría establece que los intercambios de energía entre la materia y la luz, solo son posibles por cantidades finitas (cuantos) átomos de luz, que

posteriormente se denominarán fotones. Esta teoría tropieza con el inconveniente de no poder explicar los fenómenos de tipo ondulatorio: Interferencias, difracción, etc. Nos encontramos nuevamente con dos hipótesis contradictorias, la teoría electromagnética y la de los cuantos.

2.1.5. Naturaleza dual de la luz

En la actualidad se sostiene que la luz tiene una naturaleza dual (corpúscular y ondulatoria). Se propaga mediante ondas electromagnéticas, de esta forma la luz es una fracción del espectro electromagnético (ver Figura 2.1) y presenta fenómenos típicamente ondulatorios, pero en su interacción con la materia en ciertos fenómenos de intercambio de energía tiene carácter corpúscular. Nunca manifiesta las dos condiciones simultáneamente, en un fenómeno concreto o es onda o es corpúsculo.

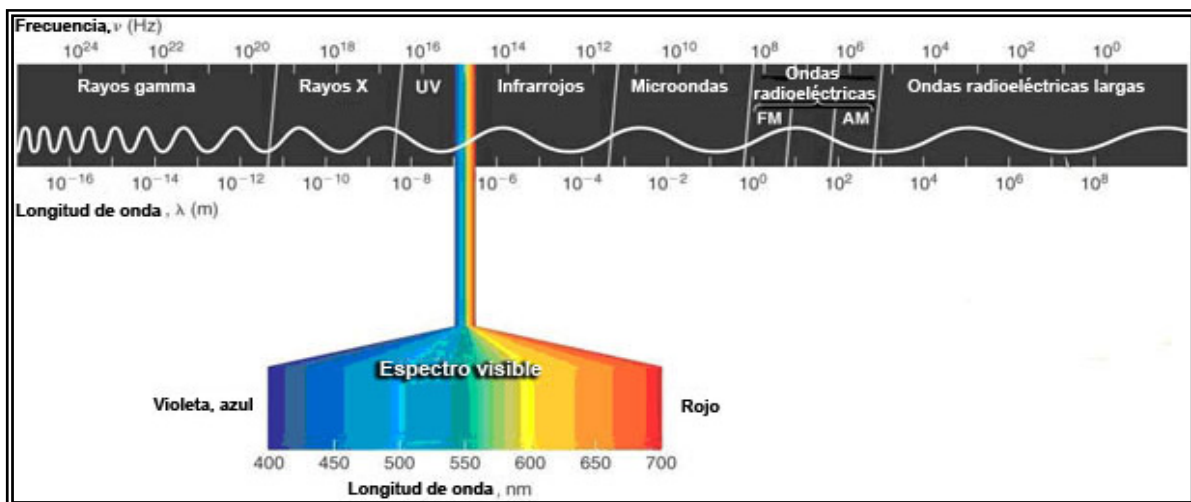


Figura 2.1. Espectro electromagnético.

2.2. Visión

La visión es el sentido que nos permite la habilidad de detectar la luz e interpretar. El sentido de la vista permite que el cerebro perciba formas colores y el

movimiento, de este modo es que vemos el mundo. En relación a la visión se deben tener en cuenta los siguientes conceptos:

- Sensibilidad visual
- Agudeza visual
- Campo visual

2.2.1. Sensibilidad visual

Sólo una pequeña parte del espectro de la radiación es visible para el ojo humano. Esta parte abarca entre 380 y 780 nm y es lo que denominamos "luz". El ojo humano no es igual de sensible a cada uno de los componentes de color de la luz. La sensibilidad máxima está en unos 555 nm (luz amarilla-verde) y disminuye a longitudes de onda más largas (roja) y más cortas (azul).

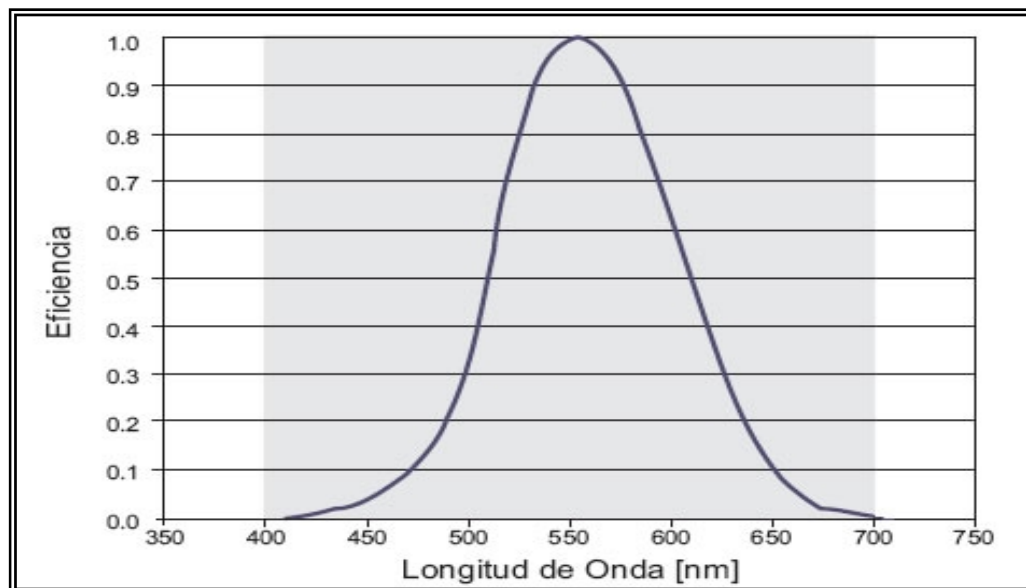


Figura 2.2. Curva espectral de la eficiencia luminosa para la visión fotópica $V(\lambda)$.

La sensibilidad del ojo humano a la luz roja (650 nm) es tan sólo de un 10% del máximo. En otras palabras, se necesitan diez veces más de luz roja para dar la misma impresión de brillo que la luz amarilla-verde.

2.2.2. Agudeza visual

Se define como la capacidad del sistema de visión para percibir, detectar ó identificar objetos espaciales bajo condiciones de iluminación buenas. Para una distancia al objeto constante, si un sujeto ve nítidamente el objeto, se dice que tal sujeto tiene una mayor agudeza visual que aquel que no ve el objeto.

2.2.3. Campo visual

Es el área total en la cual un objeto puede ser visto en la visión periférica mientras el ojo está enfocado en un punto central. Se entiende por campo visual el espacio que capta el ojo cuando mantenemos la mirada fija en un punto

2.3. Conceptos de iluminación

Brevemente serán descritos algunos conceptos y ecuaciones físicas que son importantes para el estudio y análisis de sistemas de iluminación.

2.3.1. Flujo luminoso

Es la cantidad de energía radiante emitida en el espacio por una fuente luminosa en la unidad de tiempo, percibida y evaluada en términos de respuesta visual según el valor fijado internacionalmente para la sensibilidad del ojo humano $V(\lambda)$:

$$\phi = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

Donde:

ϕ : flujo luminoso (cantidad de luz emitida por unidad de tiempo) en lúmenes (lm);

Q : cantidad de luz emitida en lúmenes por segundo (lm*s);

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

2.3.2. Eficacia luminosa

Los flujos luminosos de las lámparas se encuentran especificados en la documentación técnica del fabricante. Una interesante extensión del concepto de flujo luminoso como potencia es el de *eficacia luminosa*, relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente y la potencia empleada para obtener tal flujo. A través de esta cifra es posible evaluar el ahorro que tiene una lámpara respecto a otra. La eficacia luminosa se obtiene mediante la expresión:

$$\text{Eficacia luminosa} = \frac{\Phi_v}{P} \quad (2)$$

Donde:

- : eficacia luminosa en lúmenes por vatio (lm/W);
- : flujo luminoso emitido por la fuente de luz en lúmenes (lm);
- : potencia eléctrica consumida por la lámpara en vatios (W).

2.3.3. Luminancia (iluminación)

El concepto de iluminación está orientado a proyectos luminotécnicos, este concepto nos permite evaluar la cantidad de luz que es emitida por un cuerpo luminoso, presente sobre una superficie (ver Figura 2.3).

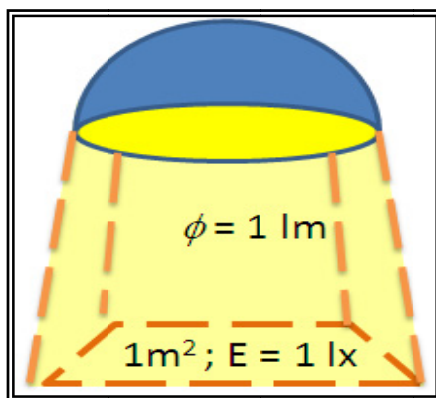


Figura 2.3. Iluminancia o iluminación.

Por tanto, la *iluminancia* o *iluminación* es la cantidad de flujo que incide sobre una superficie dividido por el tamaño de la misma. Así:

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (3)$$

Donde:

E : iluminancia o iluminación en lux (lx);

ϕ : flujo luminoso que incide sobre la superficie (lm);

A : área de la superficie afectada por el flujo (m²).

2.4. Confort visual

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), el confort puede definirse como un estado completo de bienestar físico, mental y social (Burton, 2001). Por esta razón, es normal que estudios sobre el confort frecuentemente son vistos en el dominio de factores humanos (Chang, 2008), por ejemplo en el diseño de calzado (Alcantara, et al., 2005; Alcantara, et al., 2005), diseño de edificios (da Graca, et al., 2007), diseño de ambientes al interior de edificios (Oral, et al., 2004) entre otros. En cuanto al diseño de ambientes al interior de edificios (en cuanto a confort se refiere), se busca garantizar principalmente condiciones de confort térmico, acústico, ergonómico y visual (Oral, et al., 2004; da Graca, et al., 2007).

La importancia de un ambiente confortable en relación al trabajo y productividad, o aprendizaje de los estudiantes, es bien conocido y depende principalmente del diseño del edificio y de los ajustes que se hagan en él para las actividades que ahí se desarrollen (da Graca, et al., 2007).

El grado de visibilidad y confort visual requerido en un amplio ámbito de lugares de trabajo se encuentra gobernado por el tipo y duración de la actividad a desarrollar. Para regular las condiciones de iluminación requeridas para actividades de trabajo determinadas, se encuentra regulada por normas como la UNE-EN 12461 (norma europea), o la norma oficial mexicana NOM-025-STPS-1999, donde se regulan las condiciones lumínicas para los lugares de trabajo.

2.4.1. Atributos considerables en ambientes lumínicos

Una iluminación correcta es aquella que permite distinguir las formas, los colores, los objetos en movimiento y apreciar los relieves; y que todo ello, además, se haga fácilmente y sin fatiga, es decir, que asegure el confort visual permanentemente.

Para asegurar el confort visual hay que tener en cuenta básicamente cuatro puntos, que situados por orden de importancia son los siguientes (Norma (UNE-EN12464, 2003):

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

No obstante, no debemos de olvidar otro factor fundamental para conseguir un adecuado confort visual en los lugares de trabajo, que es el tipo de iluminación: natural o artificial. La iluminación de los lugares de trabajo debe realizarse siempre que no existan problemas de tipo técnico, con un aporte suficiente de luz natural, aunque ésta, por sí sola, no garantiza una iluminación correcta ya que varía en función del tiempo. Es preciso pues compensar su insuficiencia o ausencia con luz artificial.

El confort visual depende de los niveles de iluminancia y de su distribución en el espacio, la luz intensa, el color dado, la vista, etc., al interior del edificio (Yener, 1999). La variable más adecuada para el control del confort visual es el nivel de iluminancia, medida en lux, cuando todos los otros parámetros son fuertemente subjetivos y difíciles de ser medidos.

En fotometría, la iluminancia (E) es la cantidad de flujo luminoso emitido por una fuente de luz que incide, atraviesa o emerge de una superficie por unidad de área. Su unidad de medida en el *SI* es el *Lux(lx)*.

$$1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \quad (4)$$

En general, la iluminancia se define según la siguiente expresión:

$$E_v = \frac{d\phi}{dS} \quad (5)$$

donde:

E_v = iluminancia (lx);

ϕ = flujo luminoso (lm);

dS = elemento diferencial de área considerado (m^2).

La iluminancia se puede definir a partir de la magnitud radiométrica de la irradiancia sin más que ponderar cada longitud de onda por la curva de sensibilidad del ojo.

Así, entonces:

E_v es la iluminancia;

E_λ representa la irradiancia espectral y;

$V(\lambda)$ simboliza la curva de sensibilidad del ojo, entonces:

$$E_v = K \int_{\text{visible}} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Tanto la iluminancia como el nivel de iluminación se pueden medir con un aparato llamado fotómetro. A la iluminancia que emerge de una superficie por unidad de área también se le denomina emitancia luminosa M_v .

Las normas y recomendaciones de iluminación para edificios educativos, se determinan básicamente de acuerdo a la norma UNE-EN 12464-1:2003 (Norma UNE-EN, 2003); el nivel de iluminación requerido para aulas de estudio, sala de profesores y sala de lectura varía de los 200 a 500 lux (Norma UNE-EN, 2003) (ver Cuadro A.1).

Los brillos excesivos que pueden ocasionar molestias en la visión están motivados generalmente por:

- Una visión directa de la fuente de luz.
- Una visión indirecta (reflejo) sobre una superficie reflectante.

El deslumbramiento debido a la visión directa de una ventana o una fuente de luz debe evitarse por ser una de las causas de incomodidad. Sin embargo, en el deslumbramiento debido a una visión directa de una ventana es aconsejable que, al protegerse, no se interrumpa la visión del exterior; se pueden utilizar desde cristales teñidos hasta persianas orientables.

El deslumbramiento motivado por la reflectancia o factor de reflexión de las fuentes de luz sobre superficies reflectantes como planos de trabajo, equipos de cómputo y ventanas, disminuye la percepción visual y es causa de incomodidad.

Para reducir los efectos de deslumbramiento indirecto tenemos que eliminar los reflejos molestos utilizando superficies de trabajo mates y asegurar una buena distribución de las luminarias.

Los márgenes de reflectancia útiles para las principales superficies interiores de acuerdo a la Norma UNE-EN (Norma UNE-EN 12464, 2003) se dan de acuerdo a la Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Márgenes de reflectancia para superficies interiores (fuente: norma UNE-EN 12464).

Superficie	Margen de reflectancia
Techo	0.6 a 0.9
Paredes	0.3 a 0.8
Planos de trabajo	0.2 a 0.6
Suelo	0.1 a 0.5

Para medir el factor de reflectancia de una superficie A, se tomarán con el luxómetro dos medidas de luminancias L_A y L_B .

$$R = 0.8 \left(\frac{L_A}{L_B} \right) \quad (7)$$

donde:

L_A es la luminancia de la superficie A;

L_B es la luminancia de una cartulina blanca B de superficie $\geq 35 \times 35$ cm.

En realidad, los ojos del observador no perciben la luz que incide sobre una superficie, sino la luz que ésta reflejada en su dirección, cuya medida es conocida con el nombre de luminancia. Las diferencias de luminancias de diferentes superficies u objetos, son las que nos permiten distinguir visualmente unos de otros.

El nivel de iluminación no es suficiente para asegurar el confort visual de una tarea. Es preciso además mantener un equilibrio entre la luminancia del objeto y las correspondientes a las diferentes superficies incluidas dentro del campo visual. Por las razones dadas, debería evitarse lo siguiente:

- Luminancias demasiado elevadas que pueden dar lugar a deslumbramientos.

- Contrastes de luminancia demasiados altos que causarán fatiga debido a la readaptación constante de los ojos.
- Luminancias demasiado bajas y contrastes de luminancias demasiado bajos que dan como resultado un ambiente de trabajo monótono y no estimulante.

Son importantes las luminancias de todas las superficies y serán determinadas por la reflectancia y la iluminancia en las superficies.

El área de tarea debe ser iluminada tan uniformemente como sea posible. La iluminancia de las áreas circundantes inmediatas puede ser inferior a la iluminancia de la tarea pero no debe ser menor que los valores dados en la Cuadro 2.2.

Cuadro 2.2. Uniformidades y relación entre iluminancias de áreas circundantes inmediatas al área de tarea.

Iluminancia de tarea (lx)	Iluminancia de áreas circundantes inmediatas (lx)
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	E _{tarea}
Uniformidad: ≥ 0.7	Uniformidad: ≥ 0.5

La uniformidad del área de tarea no debe ser inferior a 0.7, (ver Cuadro 2.2). Se define como “uniformidad de iluminancia” a la relación o cociente entre la iluminación mínima y la iluminancia medida sobre la superficie (8).

$$Uniformidad\ de\ iluminancia = \left(\frac{Lectura\ menor}{Lectura\ media} \right) \geq 0.7 \quad (8)$$

La consideración de los niveles de iluminación es normalmente suficiente para el análisis de las condiciones visuales, reservándose el estudio de

luminancias para casos muy específicos, como por ejemplo, el alumbrado de autopistas y carreteras.

La medición de los niveles de iluminación debe efectuarse mediante un luxómetro, colocado en el mismo plano de trabajo, y con la misma inclinación que tenga la superficie de trabajo.

Al momento de seleccionar las luminarias para crear un ambiente visual confortable, además del flujo luminoso, dos atributos importantes a considerar son la temperatura y el índice de rendimiento de color (CRI).

La temperatura de color es una medida que se especifica en las lámparas y se refiere a la apariencia o tonalidad de la luz que emite la fuente luminosa. La forma en que vemos cierto ambiente depende de la tonalidad de luz de la lámpara y es crucial para establecer una atmósfera de confort o fresca.

Las fuentes de luz que percibimos blancas y brillantes o azuladas tienen una temperatura de color arriba de los 3600°K (grados Kelvin) y la luz se denomina “luz fría”, se usan en aplicaciones industriales, oficinas, hospitales, etc.

Las fuentes de luz que percibimos rojizas o amarillentas tienen una temperatura de color abajo de los 3400°K y se denomina “luz cálida”, se usan en lugares donde se requiera un ambiente de hospitalidad y confort por ejemplo, tiendas de ropa, hogar, restaurantes, etc.

Fuentes de luz con temperatura de color de 3500°K se consideran neutras y comúnmente son usadas en lugares de trabajo incluyendo oficinas, salas de conferencias, bibliotecas, escuelas.

El índice de rendimiento de color (CRI) es la capacidad que tiene una lámpara para reproducir fielmente los colores de los objetos, y es un factor muy

importante a considerar en cualquier aplicación de iluminación. El CRI se mide en una escala de 0 a 100. La luz del sol, y la luz de una lámpara incandescente tiene un CRI de 100. Es importante saber que los objetos y personas iluminados bajo la luz con un alto CRI se ven más naturales, además que el nivel de iluminación se percibe como mayor.

En aplicaciones comerciales, las lámparas Philips con alto índice de rendimiento de color hacen que la mercancía sea más atractiva al cliente, la comida sea más apetitosa en los restaurantes y la gente en general luzca mejor, más saludable y más natural. En las oficinas incrementa la productividad del trabajador, reduce el ausentismo en el lugar de trabajo y disminuye el riesgo de cometer errores.

2.4.2. Preferencias sobre atributos de sistemas de iluminación

Para diferenciar ambientes lumínicos en interiores, son sugeridos 21 índices para evaluar el desempeño del sistema de iluminación (Fontoynont, 2002), la mayoría de estos ha sido descritos en la secciones anteriores. Todos estos atributos físicos son cuantificables mediante una o varias mediciones, sin embargo, debido a diversos factores como pueden ser la edad, el sexo, psicológicos, entre otros, una misma cuantificación puede ser percibida de manera distinta por distintos sujetos, por esta razón recientemente fue realizado un estudio donde fueron evaluados 7 atributos que engloban los 21 índices de iluminación propuestos por Fontoynot (Cheung, et al., 2008), los resultados de este estudio se aprecian en la Figura 2.4, como podemos ver son 3 los atributos de un sistema de iluminación sobre los cuales se observa una mayor preferencia.

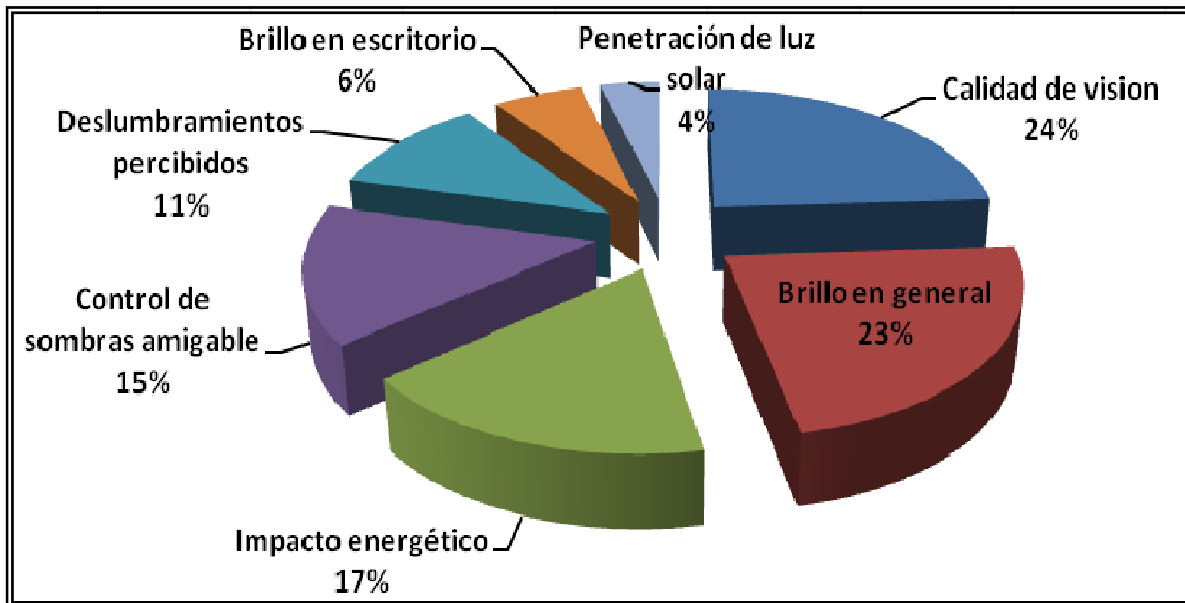


Figura 2.4. Nivel de preferencias sobre atributos de un sistema de iluminación.

2.5. Concepto de sistemas inteligentes

Durante las dos décadas pasadas han sido introducidos al mercado una gran cantidad de productos inteligentes, es por ello que el concepto de “inteligencia” ha sido empleado de una gran variedad de formas (Wong, et al., 2008); sin embargo, el concepto que engloba de mejor manera los atributos de inteligencia utilizados con el paso del tiempo es el que se esquematiza en la Figura 2.5. Tal como se aprecia en esta figura, un sistema inteligente busca principalmente mejorar la seguridad, fiabilidad y eficiencia del sistema con un mantenimiento económico.

Tales sistemas deben de ser capaces de controlar dinámicas complicadas, poseer una interacción hombre-máquina amigable, un cierto grado de autonomía que le permita tener una cierta tolerancia a fallos.

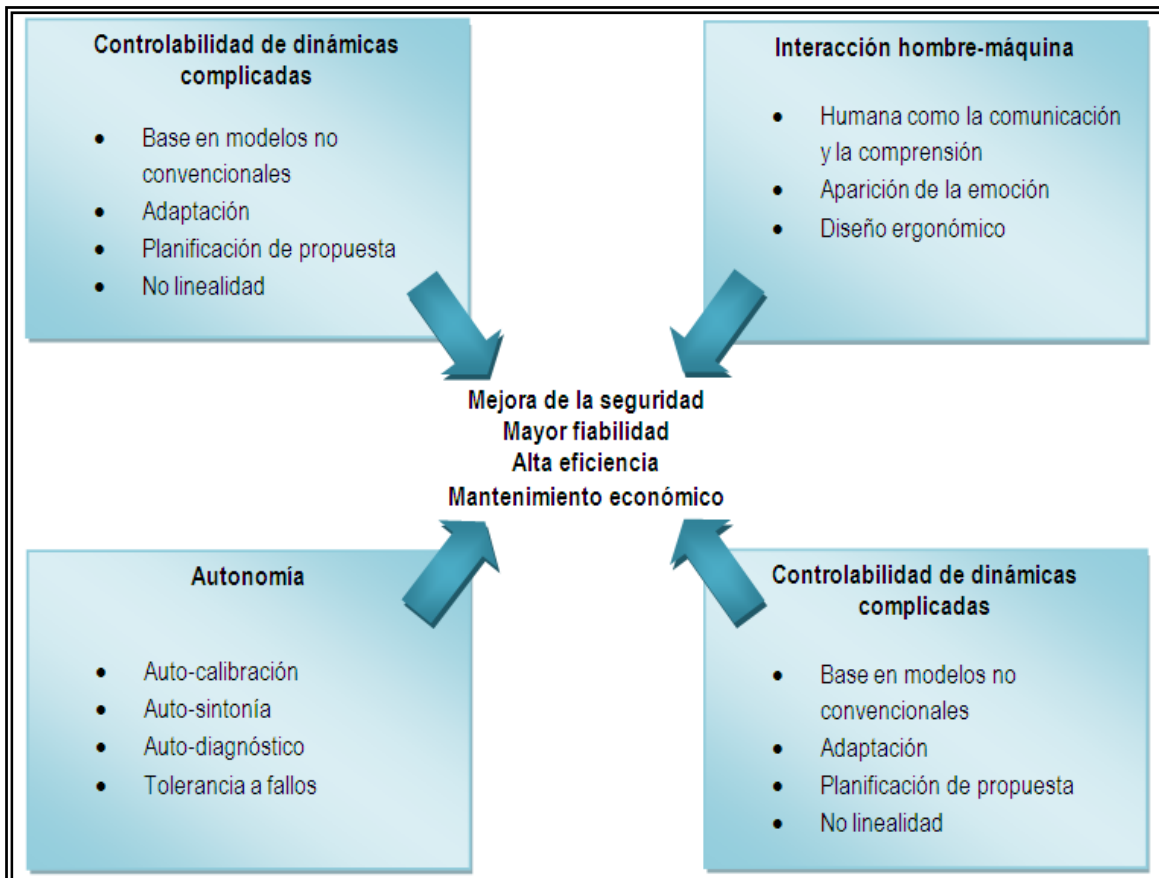


Figura 2.5. Taxonomía de los principales atributos inteligentes en un sistema inteligente (Bien, et al., 2002).

2.6. Definición de EI

Debido al desarrollo de tecnologías de información, la creciente demanda de ambientes confortables de vida y la búsqueda por hacer un uso eficiente de los recursos, han ocasionado que en los últimos 20 años la definición del concepto de EI haya sufrido varias modificaciones desde su aparición en los inicios de la década de los 80's (Wong, et al., 2005). Con base en información publicada, existen más de 30 definiciones para inteligencia en relación al edificio (Wigginton, et al., 2002). En términos generales hoy en día sugieren manejar este término como un producto de esfuerzos multidisciplinario para integrar y optimizar las estructuras, sistemas, servicios, y la administración de los recursos del edificio, buscando crear un ambiente productivo, rentable y confortable para los ocupantes

del edificio (Arkin, et al., 1997). Hoy en día, los sistemas típicos que integran un EI son 8 (Wong, et al., 2008), los cuales se encuentran esquematizados en la Figura 2.6.

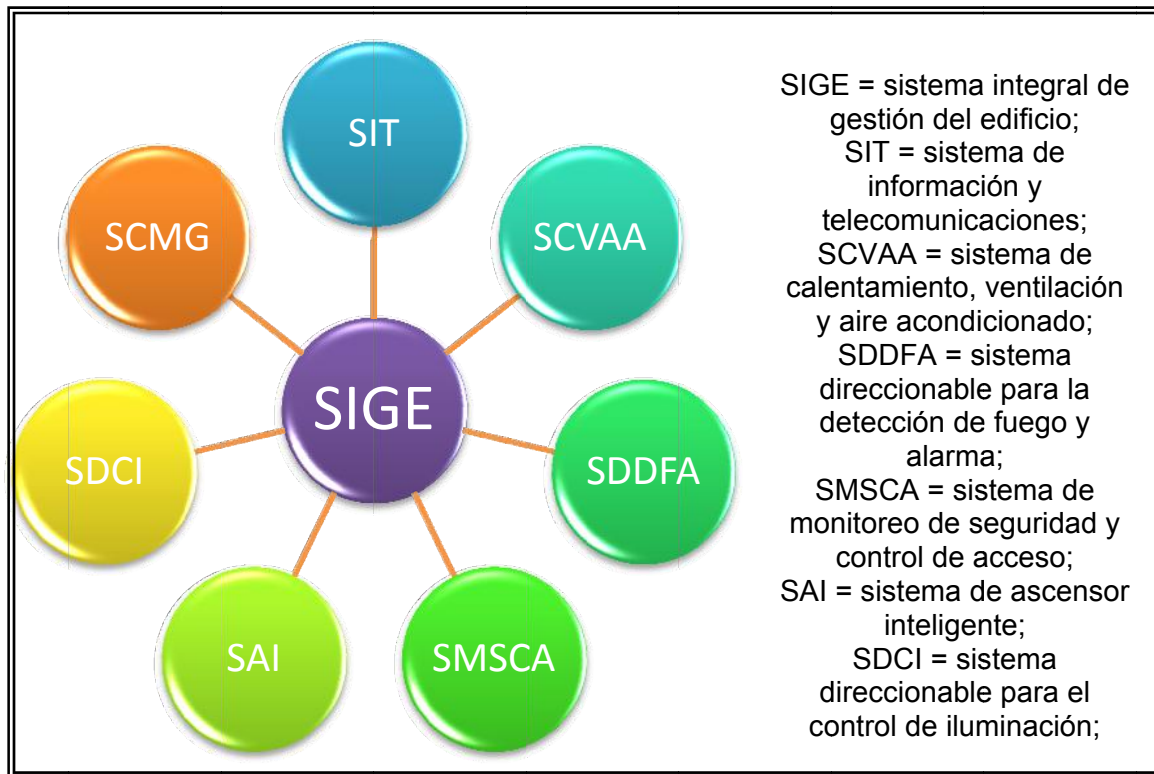


Figura 2.6. Principales sistemas de control en un EI típico.

Recientemente, se han agregado a la definición la “habilidad de aprendizaje” y “ajuste en el desempeño en función de la ocupación y del entorno ó medio ambiente” (Yang, et al., 2001; Wigginton, et al., 2002).

El objetivo general es proveer prestaciones del edificio (PE) altas (Omer, 2008), las cuales pueden definirse como calidad del ambiente interior (CAI), eficiencia energética (EE) y eficiencia de costos (EC), ver Figura 2.7.

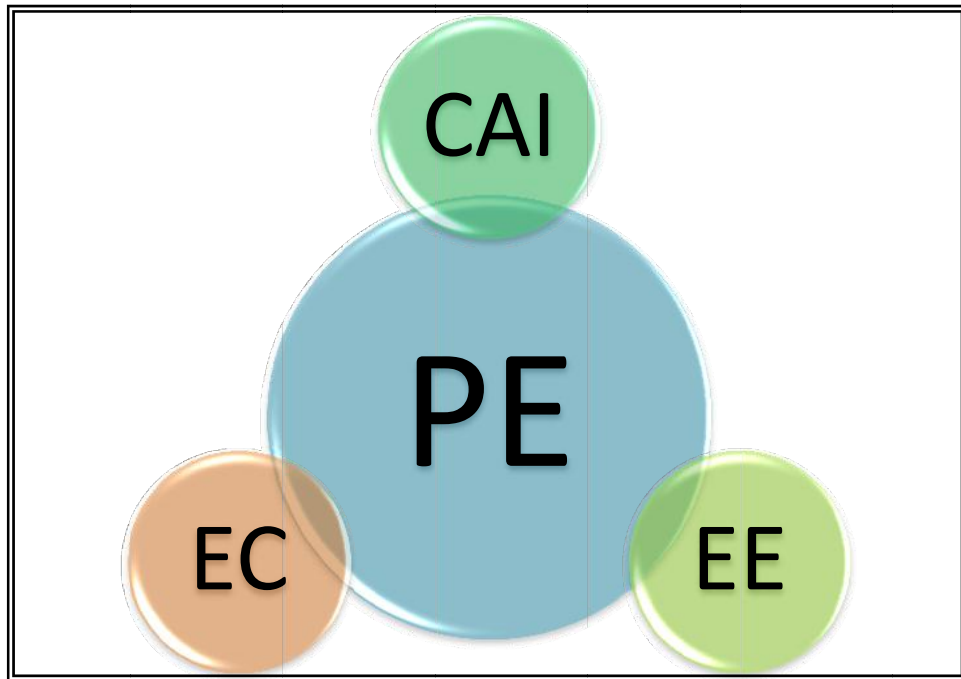


Figura 2.7. Taxonomía de las prestaciones que ofrece un edificio.

CAI se entiende como la condición de confort percibida debida a condiciones físicas y psicológicas a las cuales se ha sido expuesto por el entorno; EE se relaciona con la provisión de un ambiente interno deseado con un consumo mínimo de energía; EC son los gastos financieros que se realizan sobre la energía relativos al nivel de ambiente confortable y productivo que ofrece el edificio. En términos generales es mejorada la EC por medio de la mejora de la CAI y de la EE.

2.7. Sistema de iluminación para EI's

Una lámpara incandescente es regulada cuando opera a un voltaje menor al que fue diseñado, por consecuencia, la luz que proporciona esta luminaria así como la potencia consumida por la misma disminuyen al mismo tiempo. La mayoría de la gente que tiene conocimientos básicos de circuitos eléctricos piensa que lo que regula este tipo de lámparas es una especie de resistencia eléctrica variable, sin embargo, en la mayoría de los reguladores incandescentes de hoy en

día se encuentran presentes conmutadores de estado sólido, los cuales son los encargados de realizar la tarea de regulación en la luminaria incandescente al encenderla y apagarla unas 120 veces por segundo, a esta velocidad la conmutación de la lámpara es imperceptible para el ojo humano.

Teniendo la posibilidad de regular la potencia lumínica de las luminarias, midiendo la cantidad de luz natural presente al interior del edificio, es posible implementar un sistema de control automático que entregue sólo la cantidad de luz necesaria en función de la luz natural.

Para realizar el proceso de regulación, los balastos electrónicos reciben la señal de control por medio de algún protocolo de comunicación, el cual puede ser analógico o digital, dependiendo de esto, los balastos electrónicos son clasificados de una o de otra forma.

Se han realizado diversos estudios en busca de optimizar al máximo la eficiencia en los sistemas de iluminación, por ejemplo analizando la cantidad de luz natural que logra entrar al interior de los edificios en función de las características de las ventanas del edificio (Guishi, et al., 2005), o modelando la distribución de luz de día al interior de los edificios (Syed Fadzil, et al., 2004).

Se han diseñado sistemas de iluminación flexibles con los denominados “edificios inteligentes”, los cuales en función de la cantidad de luz natural presente al interior del edificio, regulan de manera automática la intensidad lumínica de las lámparas, tratando de asegurar un nivel de iluminación mínimo necesario para realizar de manera normal las actividades al interior del edificio, aprovechando de esta manera, con esto se busca lograr tanto un mayor ahorro de energía eléctrica, así como también aumentar el confort de los usuarios (Kolokotsa, et al., 2005; Doulos, et al., 2008). Si bien es cierto que esta clase de sistemas requieren de una mayor inversión inicial, se han realizado pruebas experimentales donde en

algunos casos particulares se ha justificado la inversión en sistemas como estos (Lee, et al., 2006).

El sistema de iluminación propuesto busca garantizar un nivel de iluminación mínimo al interior de los salones, esto al compensar de manera dinámica la luz natural provista por el medio ambiente, con luz artificial proporcionada por las luminarias fluorescentes. Esto se aprecia mejor en la Figura 2.8, como podemos ver, al inicio a las 6:00am, cuando no hay suficiente luz natural, el sistema compensa esto encendiendo a su máxima capacidad las luminarias, en el transcurso de la mañana, a medida que aumenta la cantidad de luz natural, las luminarias del sistema disminuyen la iluminación provista de forma tal que se asegure siempre un nivel mínimo de luz al interior del edificio.

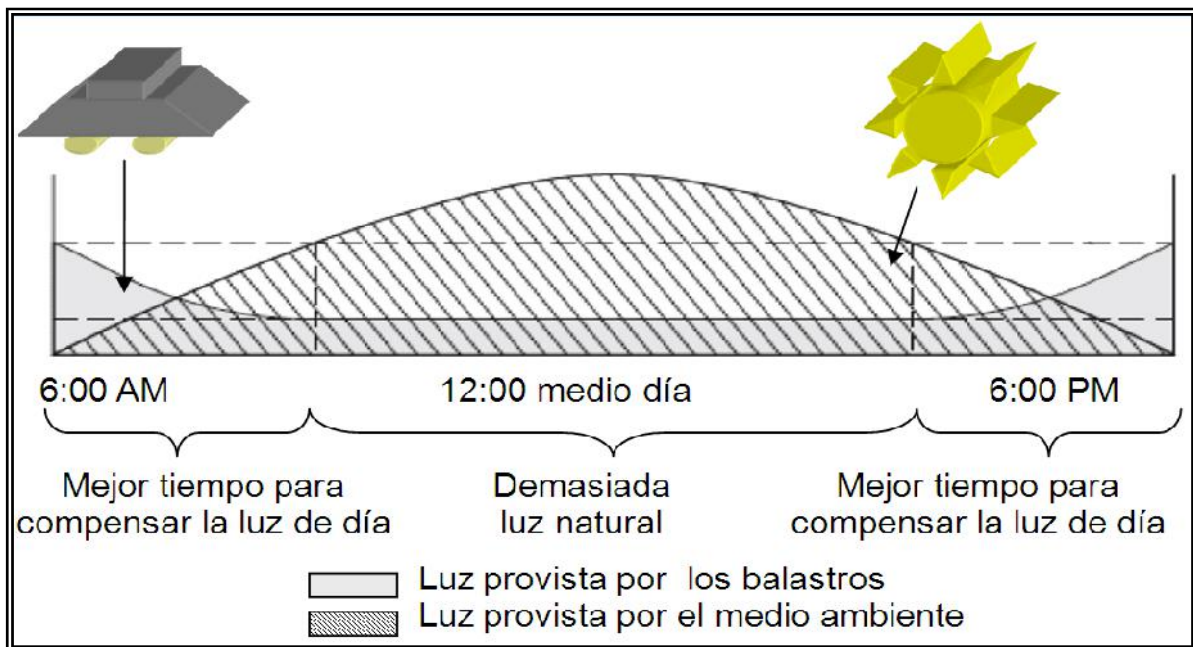


Figura 2.8. Compensación de la luz natural por la luz artificial.

En la Figura 2.9 se aprecia un diagrama a bloques del sistema de iluminación propuesto. Como podemos ver en dicho sistema restringimos el control de los usuarios de los edificios sobre las luminarias, con esto eliminamos el desperdicio de energía que se generan éstos por un mal uso de las lámparas del

edificio (Luna-Rubio, et al., 2007; Luna-Rubio, et al., 2009). Gracias al elemento sensor, podemos detectar la cantidad de luz presente al interior del edificio, es decir, es posible monitorear el nivel de iluminación natural que se encuentra presente en el interior del edificio y en función de eso, compensar con luz artificial lo que sea necesario para garantizar un nivel de iluminación mínimo necesario para realizar las actividades propias al interior del edificio.

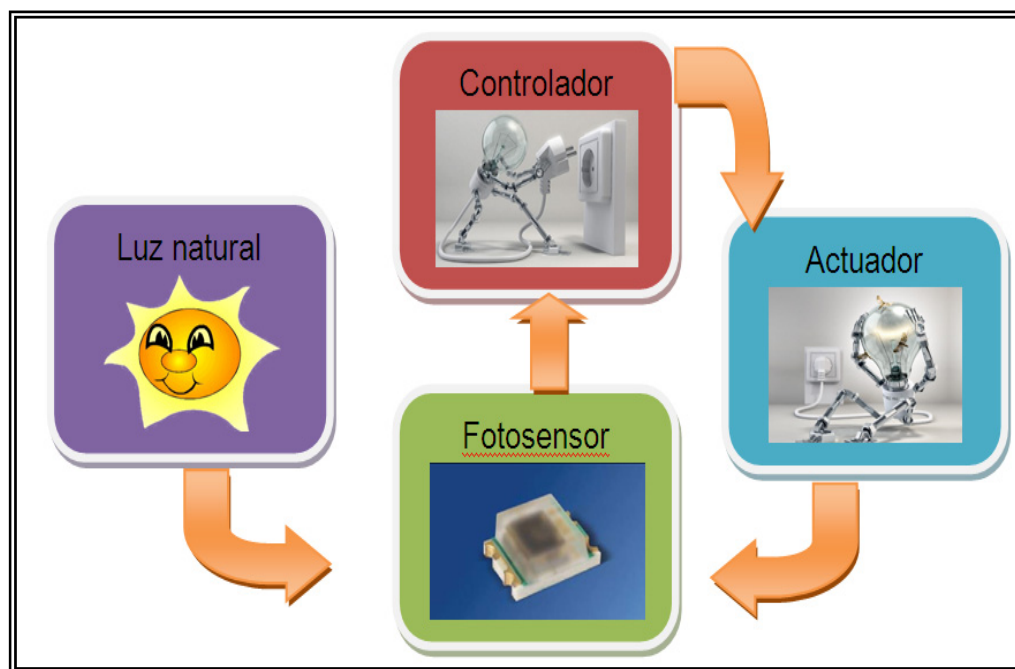


Figura 2.9. Componentes del sistema de control de iluminación regulable automático.

Para que hoy en día un sistema de iluminación para edificios inteligentes sea considerado como tal, es necesario que cubra con algunos de los indicadores de inteligencia mostrados en el Cuadro 2.3.

2.7.1. Interfaz de control

Dependiendo de las características del edificio, al diseñar el sistema de iluminación regulable puede ser más recomendable utilizar ya sea balastos electrónicos que empleen como interfaz de control una señal analógica o bien un protocolo de comunicación digital. Por ejemplo, balastos que utilizan una señal de

control analógica (generalmente reciben una señal estándar que varía entre 0 y 10 voltios) tal como se aprecia en la Figura 2.10, son conectados en paralelo, es decir, es decir la señal de control es común a todas las luminarias y sólo se tiene acceso a ella desde un punto (Ribarich, et al., 2002).

Cuadro 2.3. Indicadores de inteligencia para los sistemas de iluminación para El's (Wong, et al., 2008).

Atributos y sus indicadores asociados			
Autonomía	Controlabilidad	Interacción hombre-máquina	Comportamiento bio-inspirado
• Algoritmo de control con adaptación de límites (e.g. limitación de los umbrales min/max, adaptación de la tolerancia al fallo) • Monitorización del desempeño de las lámparas tal como el rendimiento y las horas en que pueden ser conectadas • Auto-diagnóstico para detectar deterioro temporal	• Adaptable al horario de ocupación laboral • Detección de presencia (i.e. sensores de presencia regulables) • Control individual y grupal de luminarias • Interfaz con el sistema de gestión de la energía, sistema de automatización del edificio o sistema de gestión integral del edificio	• Proporcionar el personal de gestión con base de datos y herramientas analíticas para operación y evaluación de los servicios • Proporcionar el acceso de los usuarios a la información de los sistemas provistos • Pre-programada respuesta y control • Uso de interfaz vía internet/intranet o control remoto	• Proporcionar múltiples niveles y modos de control para que los ocupantes los fijen de manera personalizada. • Medición de la intensidad de luz y ángulo de proyección y radiación solar para maximizar la luz natural y reducir el consumo de energía eléctrica debido a la iluminación artificial (i.e. conmutación foto-eléctrica y control regulable) • Control automático de iluminación y sombras

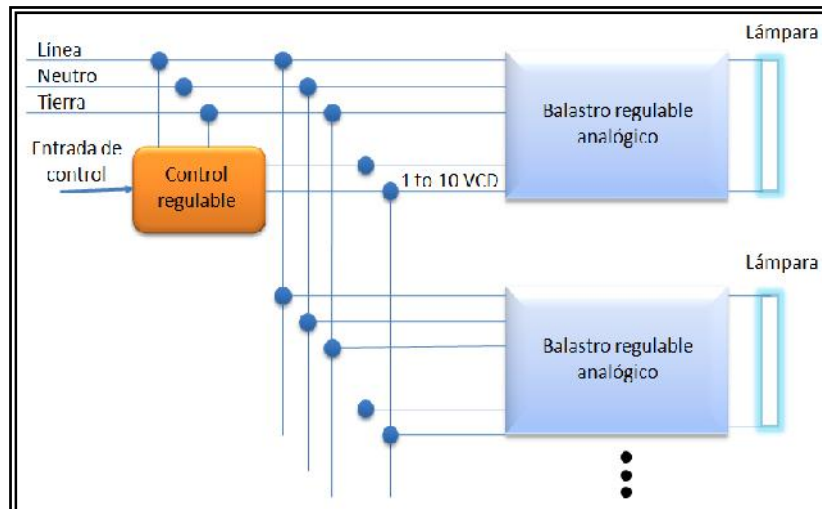


Figura 2.10. Topología de conexión en un sistema de iluminación basado en balastos regulables analógicos.

En cuanto a interfaz digital de balastos se refiere, existe el protocolo de comunicación DALI (*digitally addressable lighting interface*) el cual es un estándar establecido de acuerdo a normas internacionales (UNE-EN60929, 2006). DALI permite controlar de manera individual o por grupos (16 grupos) hasta 64 balastos por sección de la red; una topología común en este esquema de sistemas de iluminación es la que se aprecia en la Figura 2.11. Como se puede ver, gracias a este tipo de comunicación, el cableado de control se simplifica y se potencia al tener la posibilidad de controlar el sistema desde distintos puntos en la red (Ribarich, et al., 2002).

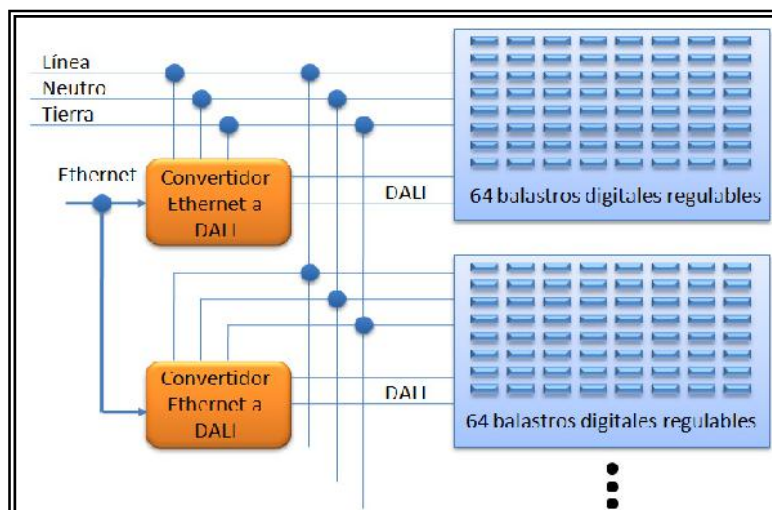


Figura 2.11. Topología de conexión en un sistema de iluminación basado en balastos regulables con interfaz de comunicación DALI.

2.8. Técnicas de control para la creación de ambientes lumínicos artificiales

Para la creación de ambientes lumínicos artificiales, se ha buscado lograr una interacción entre el uso de luz natural y luz artificial, al controlar el nivel de iluminación mediante la regulación de la intensidad lumínica del alumbrado artificial interior; así como también mediante controlar el grado de apertura de persianas (lo que se ha llamado control de sombras). A continuación se muestran algunas de estas estrategias.

2.8.1. Estrategias de control para capturar y aprovechar la iluminación natural

En los sistemas de iluminación para El's, se busca aprovechar al máximo la iluminación que entra al interior de los edificios sin afectar el confort, para ello, se implementan tanto arreglos arquitectónicos, como estrategias de control automático sobre sistemas de sombras y de alumbrado (Leslie, 2003; Guishi, et al., 2005; Gugliermetti, et al., 2006; Lee, et al., 2007; Wong, et al., 2008). Con lo que respecta al control automático de luminarias y sistemas de sombras, los controladores de mayor y que han dado buenos resultados han sido aquellos que se basan en lógica difusa (Kolokotsa, 2003; Kolokotsa, et al., 2005; Kolokotsa, et al., 2006; Trobec Lah, et al., 2006; Tsangrassoulis, et al., 2006), esto quizá es debido a la robustez y a la sencillez para la sintonización del controlador.

2.9. Control basado en lógica difusa

Con base en la literatura revisada, se ha visto que técnicas de control inteligente (como las basadas en lógica difusa) han presentado buenos resultados al controlar el ambiente interior de los edificios. Este tipo de estrategias de control permiten realizar acciones correctivas a partir de apreciaciones imprecisas, es una

herramienta poderosa de control no lineal que trata de emular el razonamiento humano. A continuación se dará una introducción al control basado en lógica difusa.

2.9.1. Conjuntos difusos y lógica difusa

Conjunto difuso es un concepto introducido por L.A. Zadeh en la Universidad de California en Berkeley en el año de 1965 para procesar o manipular información y datos afectados por una cierta incertidumbre no probabilística (Zadeh, 1965). La teoría de conjuntos difusos parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una función de pertenencia ($\mu(x)$). La lógica difusa es esencialmente una lógica multievaluada, ya que los valores de $\mu(x)$.

2.9.2. Conceptos básicos

Sea X un conjunto no vacío de objetos que consideramos como referencia, un conjunto clásico A expresado como sigue

$$A = \{x \in X \mid x \text{ cumple con algunas condiciones}\} \quad (9)$$

La teoría de conjuntos clásicos requiere que un conjunto tenga fronteras bien definidas. Si usamos la función de membrecía o de pertenencia cero-uno para definir el conjunto A , denotada por $\mu_A(x)$ tenemos lo siguiente:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{sii } x \in A \\ 0, & \text{sii } x \notin A \end{cases} \quad (10)$$

(Nota: “sii” significa “si y solo si”, $\{1,0\}$ es llamado el conjunto de valuación).

El grado de membrecía de un conjunto clásico es cualquiera de los valores 1 ó 0. Un conjunto difuso es una extensión de un conjunto clásico,

llamamos conjunto difuso cuando el grado de membrecía puede tomar cualquier valor dentro del intervalo $[0,1]$ (Zadeh, 1965). De la misma manera que en los conjuntos clásicos, mientras el valor de $\mu_A(x)$ sea más cercano a 1 indica que x pertenece más al conjunto A . De esta manera los conjuntos clásicos pueden ser vistos como un caso especial de conjuntos difusos. Un conjunto difuso puede representarse en forma continua utilizando una gráfica o de forma discreta mediante un conjunto de pares ordenados $(x, \mu_A(x))$, donde x es el elemento y $\mu(x)$ es su grado de membrecía o pertenencia al conjunto difuso A . Consideremos el ejemplo

$$A = \{x \in X \mid x \text{ es un número pequeño}\} \quad (11)$$

La representación gráfica del conjunto difuso A expresado de manera continua puede ser mediante la Figura 2.12, como podemos apreciar a medida que el número evaluado se acerca a cero, el grado de membrecía aumenta.

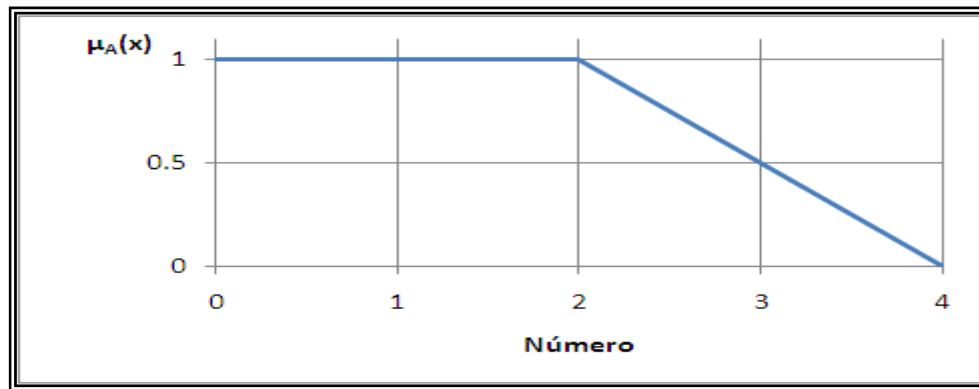


Figura 2.12. Ejemplo de un conjunto difuso A .

O mediante la función de membrecía siguiente:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & 0 < x < 2 \\ -\frac{1}{2}x + 2 & 2 < x < 4 \\ 0 & 4 < x \end{cases} \quad (12)$$

Una representación discreta del conjunto difuso A podría ser

$$A = (x, \mu_A(x)) = \{(0,1), (1,1), (2,1), (3,0.5), (4,0)\} \quad (13)$$

2.9.3. Sistemas de control basados en lógica difusa

Los sistemas basados en lógica difusa emulan el razonamiento del cerebro humano, lo cual permite manejar la información de manera imprecisa en forma de conjuntos difusos. Tales conjuntos son combinados entre sí para definir acciones, de esta manera los sistemas de control basados en lógica difusa

Técnicas de control basadas en lógica difusa han sido ampliamente utilizadas en sistemas de EI's, esto debido a que para su implementación no es necesario conocer el modelo matemático de la planta a controlar, además del buen desempeño que estas técnicas han demostrado ante controladores clásicos (Kolokotsa, 2003; Kolokotsa, et al., 2006; Trobec Lah, et al., 2006). El control difuso es una metodología de control inteligente que imita el razonamiento humano y actúa con base en lógica difusa (Kovacic, et al., 2006).

El camino propuesto por la lógica difusa es rápido y simple, especialmente aplicado en sistemas cuyos datos sean imprecisos o desconocidos, o donde las "variables" se ocultan o no están al alcance para aplicarle los poderosos métodos de diseños y ajustes, como los apoyados por las transformadas de Laplace o Z en los modelos externos, o como los basados en variables de estado en los modelos internos (Bahat, et al., 2000; Gottschalk, et al., 2003).

La propuesta difusa es acercar la forma del razonamiento humano al modelado de sistemas, aplicando especialmente los conceptos de experiencia y conocimiento del comportamiento del proceso. Un conjunto difuso a diferencia de un conjunto clásico, es un tipo especial de conjunto que permite la pertenencia parcial de sus elementos. Puede pertenecer a uno o más conjuntos con distintos grados de pertenencia. La aplicación de la lógica difusa es proyectada hacia una gran cantidad de disciplinas, debido a la ventaja de poder implementar sistemas basados en ella tanto en hardware como en software. Dichas aplicaciones no se logran con el uso del modelado matemático convencional, sino con lógica difusa y

su lenguaje de cómputo coloquial. La lógica difusa llena los calificadores ambiguos como “permanente”, “luz” o “sobre el promedio” con claros modelos que pueden ser entendidos por las computadoras. Por lo anterior incorporamos el diseño de un control automático para el sistema de iluminación al interior de salones de clase.

2.9.4. Etapas para el desarrollo del controlador difuso

Para el desarrollo del control automático basado en esta técnica, existen tres elementos básicos (Diedier, et al., 1980; Driankov, et al., 1998; Babuska, 1998):

1. Fusificación.
2. Máquina de inferencias.
3. Defusificación.

Es el proceso en el que obtenemos el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto difuso, está dado por la función de pertenencia $\mu(x)$; por ejemplo en la Figura 2.13 se muestra la fusificación de la variable x . Como podemos apreciar en función del valor nítido observado se realiza una correspondencia con cada uno de los distintos conjuntos difusos propuestos con un grado de membrecía o pertenencia $\mu(x)$; es decir, la variable x observada es transformada en uno o varias de las expresiones lingüísticas que representan a los conjuntos (Bajo, Medio, Alto).

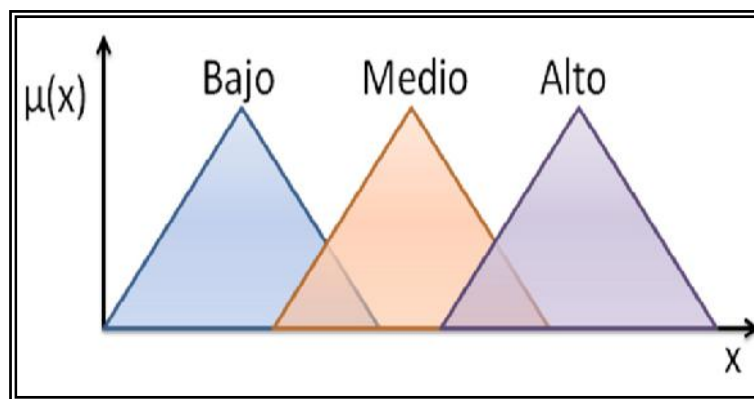


Figura 2.13. Fusificación de la variable x en los conjuntos difusos Bajo, Medio y Alto.

La manera en que obtenemos el grado de pertenencia de una variable a un conjunto difuso, está dado por la función de pertenencia, a saber podemos considerar las funciones de pertenencia triangular y trapezoidal (ver Figura 2.14).

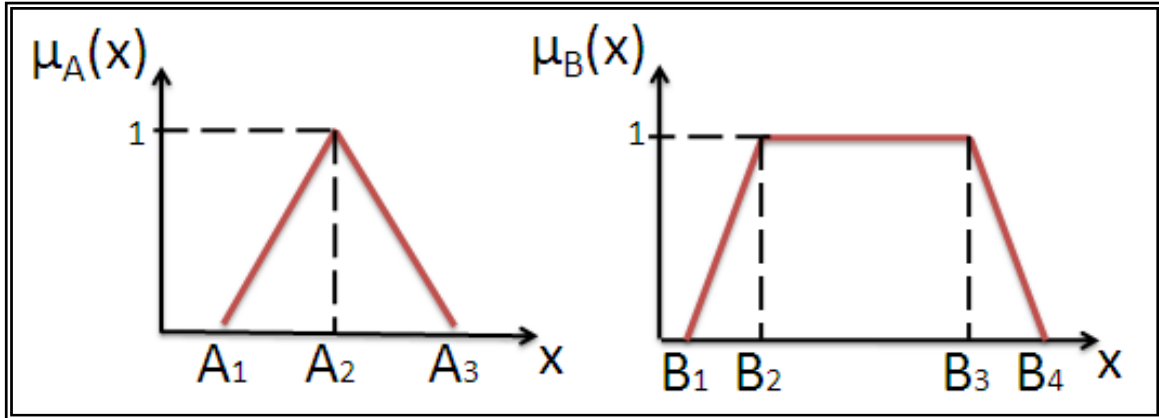


Figura 2.14. Fusificadores a emplear a) fusificador triangular, b) fusificador trapezoidal.

Transforman un valor numérico real $X^* \in U$ en un conjunto difuso A en V , con función de membrecía (14) para el fusificador triangular y (15) para el trapezoidal.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , x = A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_2 - A_1} & , A_1 < x < A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_3 - A_2} & , A_2 < x < A_3; \\ 0 & , \text{en otro caso} . \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 1 & , B_2 \leq x \leq B_3; \\ 1 - \frac{|B_2 - x|}{B_2 - B_1} & , B_1 < x < B_2; \\ 1 - \frac{|x - B_3|}{B_4 - B_3} & , B_3 < x < B_4; \\ 0 & , \text{en otro caso} . \end{cases} \quad (15)$$

donde:

x es un valor real del instante en que se está midiendo.

Con base en las reglas definidas en la etapa previa, en esta fase es simulado el proceso de toma de decisiones del experto, en este punto se obtienen conclusiones sobre la acción correctiva a tomar en función de las expresiones lingüísticas generadas a partir del proceso de fusificación, esto es mediante una sucesión de reglas de inferencias tipo <IF ... THEN>, se establecen los términos difusos de salida del controlador, por ejemplo:

- **IF** E_{int} es baja & E_{ext} es baja **THEN** Encender Lámparas

La determinación de los rangos de cada uno de los conjuntos difusos, así como las reglas son determinados mediante un proceso de experimentación, es decir, contienen la experiencia adquirida por el diseñador del controlador.

Hasta esta parte, la acción de control a realizar se encuentra en términos de conjuntos difusos, para obtener un dato nítido nuevamente y tomar una acción correctiva, es necesario realizar un proceso inverso a la fusificación, al cual denominaremos defusificación.

Es el proceso inverso de la fusificación, dado un grado de pertenencia de distintos conjuntos difusos de salida afectados, debemos hallar el valor al cual le corresponde el grado de pertenencia, en este proceso las conclusiones de la máquina de inferencias son transformadas de valores lingüísticos a un valor nítido el cual es regresado al mundo real en el proceso como una acción correctiva del controlador. Tal como se aprecia en la Figura 2.15, de la máquina de inferencias resultan una serie de conjuntos Z_i con un grado de pertenencia o peso w_i , los cuales indican la acción de correctiva a tomar.

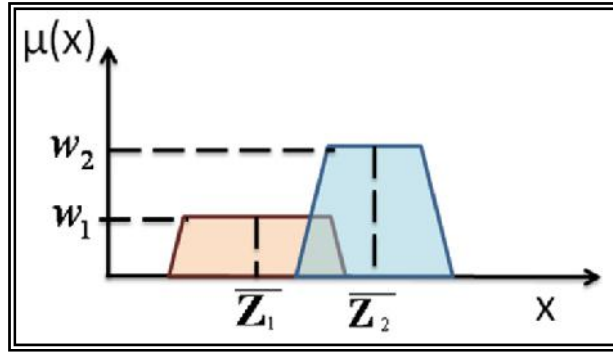


Figura 2.15. Resultado de una máquina de inferencias.

Uno de los defusificadores más utilizados debido al mayor grado de precisión es el método del centro de gravedad (CDG) (Jantzen, 1998; Passino, et al., 1998; Škrjanc, et al., 2001).

$$u^* = \frac{\sum_i b_i \int \mu(u(i))}{\sum_i \int \mu(u(i))} \quad (16)$$

Si designamos por b_i el centro de la función de pertenencia i . Entendemos por centro, el valor de $u(t)$ para el que se alcanza el valor máximo de la función de pertenencia.

En el caso particular de funciones de pertenencia triangulares y simétricas, con base w y cortadas a una altura h , el área se calcula mediante la fórmula:

$$\int \mu(u(i)) = w_i \left(h_i - \frac{h_i^2}{2} \right) \quad (17)$$

Otro de los defusificadores es el promedio de los centros (ver Figura 2.15); consiste en los centros que es la altura máxima de los triángulos que quedan formados por dos trapezoides. Es el más sencillo de calcular y programar.

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^M Z_i W_i}{\sum_{i=1}^M W_i} \quad (1)$$

Con estos conceptos de lógica difusa en mente, ahora abordamos a la estructura que tiene un controlador difuso como se muestra en la Figura 2.16.

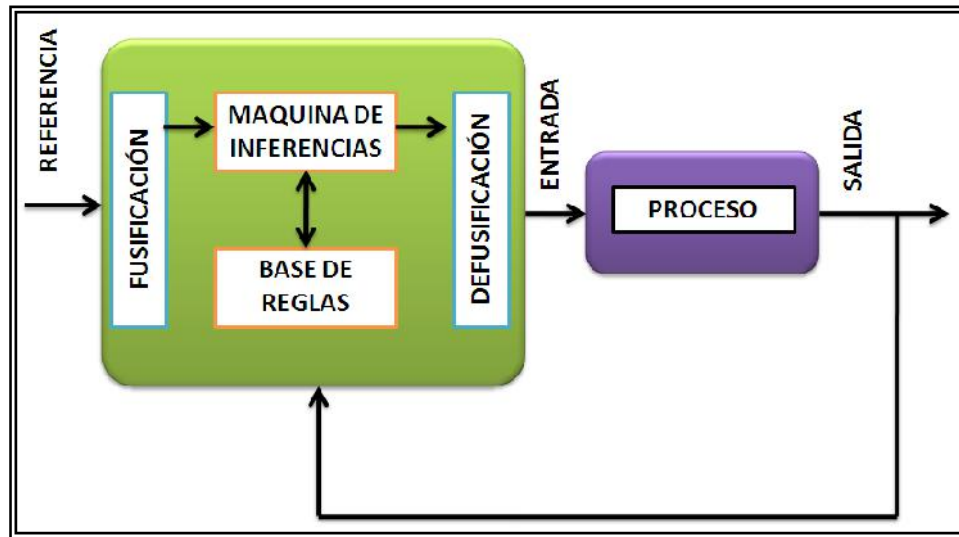


Figura 2.16. Topología de un controlador de lógica difusa en lazo cerrado.

Capítulo 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del edificio

Para el presente trabajo, fue utilizado el edificio de clases de postgrado de la Facultad de Ingeniería en la UAQ, el cual tal y como se aprecia en la

Figura 3.1, es de un nivel, el cual cuenta con 4 salones que tienen un área cubierta de 48 m^2 , una sala de juntas con una área cubierta de 56 m^2 , un salón de juntas para profesores de 40 m^2 y un cuarto de control de 16 m^2 , con una altura correspondiente de 3 m.

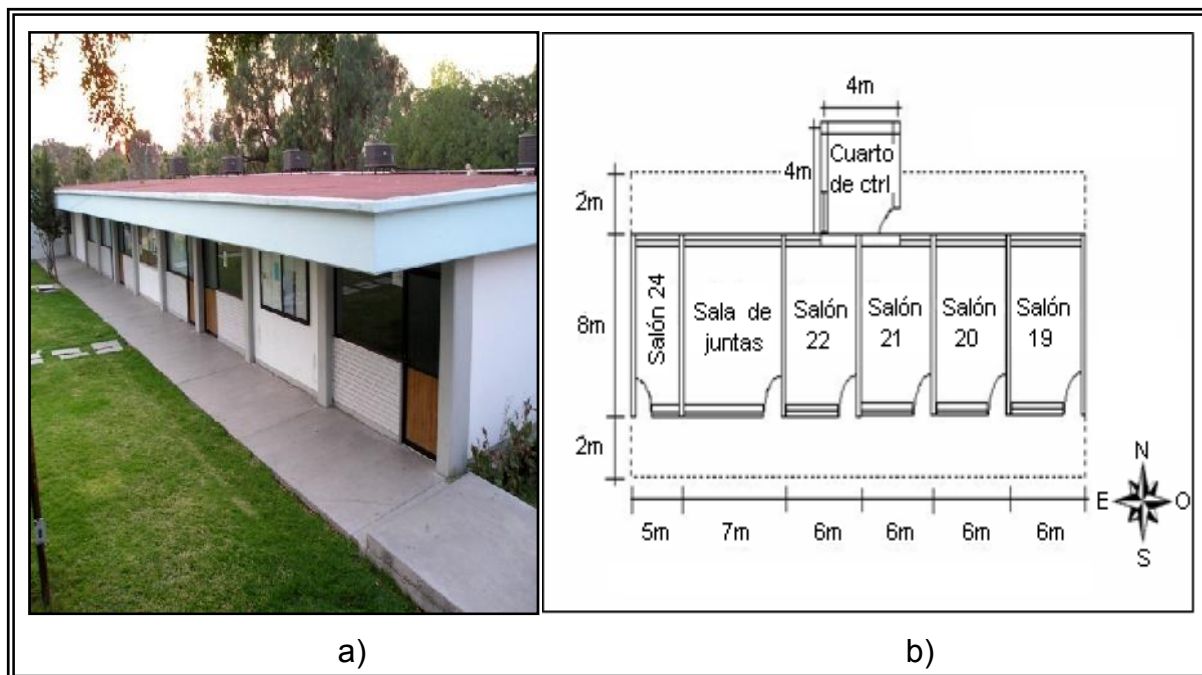


Figura 3.1. a) Edificio sujeto a experimentación. b) Vista de planta del edificio (Ríos-Moreno, et al., 2007).

Con el objetivo de proveer de una mejor iluminación, el diseño del edificio cuenta con dos ventanas una al norte y otra al sur con dimensiones de 4 m de largo por 2 m de alto, con un espesor de 5 mm, lo cual nos augura un buen aprovechamiento de la luz de día al implementar el sistema de iluminación regulable (Guishi, et al., 2005).

Los salones seleccionados para este estudio pueden ser considerados como idénticos de acuerdo a sus características tan similares (las superficies de ventanas, dimensiones y orientación al sol que presentan son similares, razón por la cual, será aproximadamente igual la cantidad de luz de día que pueda entrar a cada uno de los salones).

3.2. Modificaciones realizadas al sistema de alumbrado

Para realizar el control sobre el sistema de alumbrado del salón de clases, se instalaron dos sensores SFH 5711 para monitorizar la iluminación interna y externa del edificio (ver Figura 3.2).

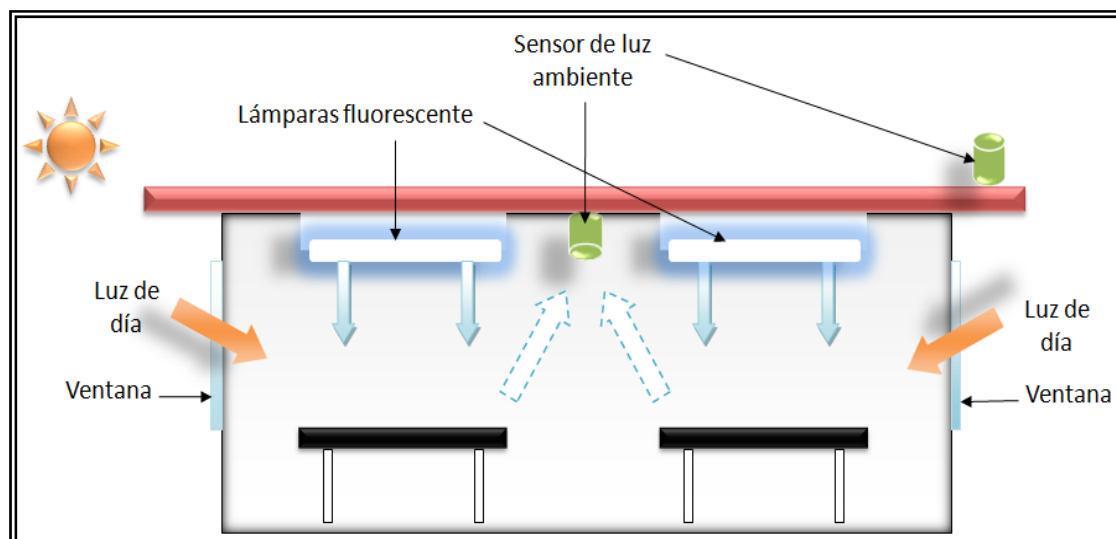


Figura 3.2 . Ubicación de los sensores de luz ambiente.

Respecto al control y monitorización del consumo energético de las luminarias, fueron instalados balastros regulables analógicos en el salón 21, de los cuales se puede llevar un registro de la monitorización de manera remota desde el denominado cuarto de control (Tejo-Perea, et al., 2005)(ver Figura 3.3).

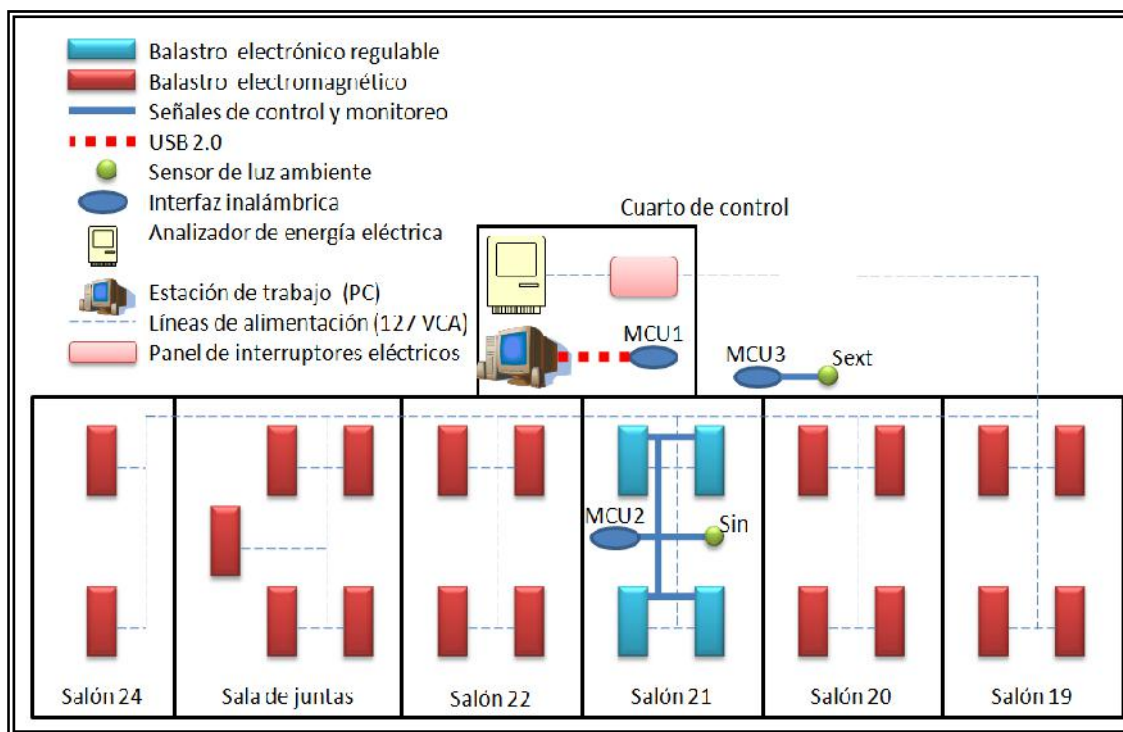


Figura 3.3. Modificación realizada al sistema de alumbrado del edificio.

3.2.1. Renovando luminarias

En el Cuadro 3.1 se muestra una comparativa entre las características de las luminarias que actualmente se encuentran instaladas en toda la Facultad (F96T12/D), contra unas luminarias que presentan una mayor eficiencia y que cumplen con las necesidades requeridas en los edificios.

Cuadro 3.1. Comparativa de las luminarias actuales (F96T12/D) contra las luminarias propuestas (F32T8/TL84).

Modelo de luminaria	F96T12/D	F32T8/TL84
Diámetro (in)	1 ½	1
Longitud (in)	96	48
Flujo luminoso medio (lm)	5200	3000
Vida media (hrs)	12000	20000
Temperatura de color (°K)	6250	4100
Índice de rendimiento de color	79	85
Potencia (W)	75	32

Como podemos apreciar, físicamente las nuevas luminarias son de menor tamaño, tienen una menor potencia y entregan un flujo luminoso menor. Considerando que los salones se encuentran instaladas 8 luminarias de este tipo y que un salón normal tiene una superficie de $37,6 \text{ m}^2$, suponiendo que las persianas de los salones se encuentren cerradas y las luminarias encendidas, en un salón equipado con lámparas F96T12/D en promedio estarían presentes alrededor de 1100 lx, lo cual excede las necesidades del edificio (para un salón de clases son requeridos alrededor de 300 lx), mientras que en un salón similar pero equipado con lámpara F32T38/TL84, con las persianas cerradas y las luces encendidas, se dispondría al interior del salón con una iluminación promedio de 600 lx.

Como no todos los salones de la facultad cuentan con persianas, es correcto que la iluminación promedio prevista sea mayor a la requerida, ya que parte del flujo luminoso que entregan las luminarias sale fuera del edificio a través de las ventanas.

Por otro lado, la temperatura del color de las luminarias F32T8/TL84 es más adecuada para el edificio donde se planean instalar (salones de clases), mientras que las luminarias F96T12/D proporcionan una temperatura de color mayor a la requerida, al utilizar la correcta iluminación en los salones, en teoría se mejora el rendimiento de los alumnos.

Finalmente, las luminarias F32T8/TL84 presentan notablemente un mayor tiempo de vida, así como también ofrecen un mejor CRI, lo que nos permite tener una mejor visión de las cosas.

Como podemos ver, las luminarias F32T8/TL84 se adecuan a las necesidades de los salones de clases donde se piensan instalar, además de que presentan considerables mejoras sobre sus antecesoras las luminarias F96T12/D.

3.2.2. Renovando balastros

El tipo de balastro empleado en las luminarias F96T12/D, es del tipo electromagnético, creado por ISB Sola basic con número de catálogo 650-266, es un balastro de encendido instantáneo que soporta dos luminarias F96T12.

Por otro lado, el balastro empleado para las luminarias F32T8/TL84, es del tipo electrónico regulable del fabricante Quicktronic e importado en México por Osram, de las serie QTP2X32T8/127/DIM-B, este es un balastro que presenta notables mejoras que sus antecesores los balastros electromagnéticos, ya que presenta un alto factor de potencia ($>0,99$), una baja distorsión armónica ($<10\%$), y un nivel de sonido A, lo que nos habla de una mayor eficiencia en el mismo.

En el Cuadro 3.2 se muestra una comparativa entre los balastros utilizados.

Cuadro 3.2. Comparativa entre los balastros utilizados.

Balastro	Electromagnético	Electrónico regulable
Tensión de línea (voltios)	127	127
Corriente de línea máxima (amperios)	1.2	0.5
Número de luminarias que maneja	2	2
Nivel de sonido	B	A
Factor de potencia	Alto	Alto (>0.99)

Como podemos ver, el balastro electromagnético consume una mayor cantidad de corriente eléctrica, lo que nos representa un consumo de energía extra al que presenta el balastro electrónico.

3.3. Cuantificando niveles de iluminación

Para realizar la medición de los niveles de iluminación, se utilizó como instrumento patrón el luxómetro portátil HI97500 de HANNA Instruments y como sensor de instrumentación fue utilizado el foto-diodo SFH5711.

3.3.1. Luxómetro portátil HI 97500

El HI 97500 es un luxómetro portátil desarrollado por HANNA Instruments, el cual fue diseñado para realizar mediciones de luminosidad de manera simple. Como elemento sensor, cuenta con un foto-diodo que es sensible al mismo espectro de luz que el ojo humano. Como podemos ver en el Cuadro A.2, este instrumento es ideal para realizar las mediciones de iluminación natural presente tanto al interior del edificio, como al exterior del mismo, ya que cuenta con un amplio rango de medición con una buena precisión, lo que nos permite medir de manera correcta la luz natural proveniente del sol de manera directa, así como también la luz artificial que entregan las luminarias.

3.3.2. Sensor de luz ambiente empleado

Para capturar los niveles de iluminancia, se propone utilizar el foto-sensor de luz ambiente SFH 5711 el cual es fabricado por OSRAM. Este componente, a diferencia de los elementos foto-sensibles de Si, ofrece una perfecta relación con la sensibilidad espectral del ojo humano tal y como se aprecia en la Figura 3.4.

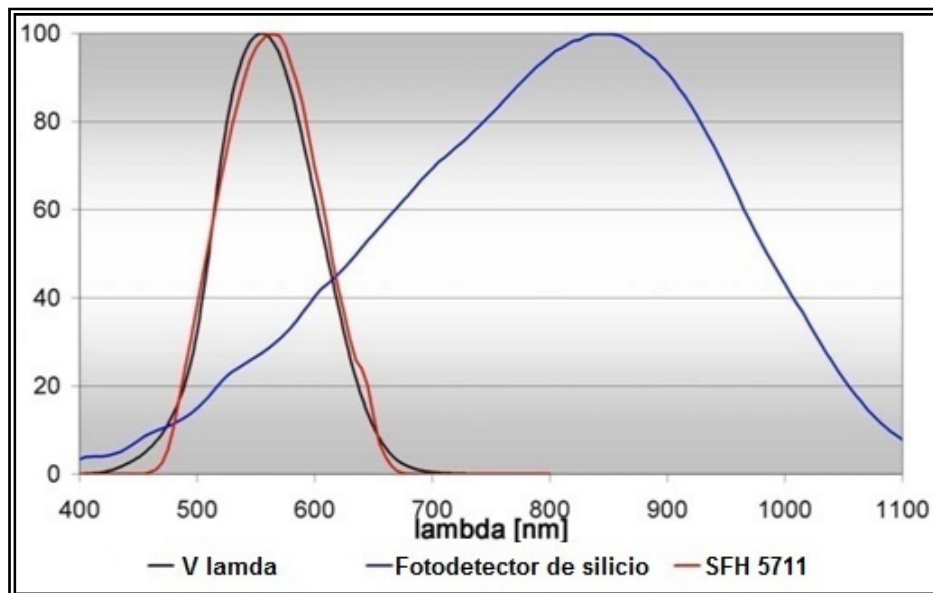


Figura 3.4. Sensibilidad espectral relativa de un foto-detector estándar de silicio y el sensor SFH 5711 comparados con el ojo humano ($V(\lambda)$) (Osram, 2006).

Este sensor entrega una corriente eléctrica logarítmica expresada en la Ecuación (19).

$$I_{out} = S \cdot \log(E_v/E_o) \quad (19)$$

Donde

$E_o = 1 \text{ lx}$;

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

$E_v = \text{iluminancia medida}$.

Es por ello que dependiendo de la aplicación y el rango de medición deseado, este sensor suele emplearse típicamente en las configuraciones que aparecen en la Figura 3.5. 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 análoga a la intensidad lumínica medida, e inclusive, en ocasiones es utilizado un multiplexor para conmutar tal resistencia con la finalidad de tener una buena resolución sobre un amplio rango de valores (ver Figura 3.5).

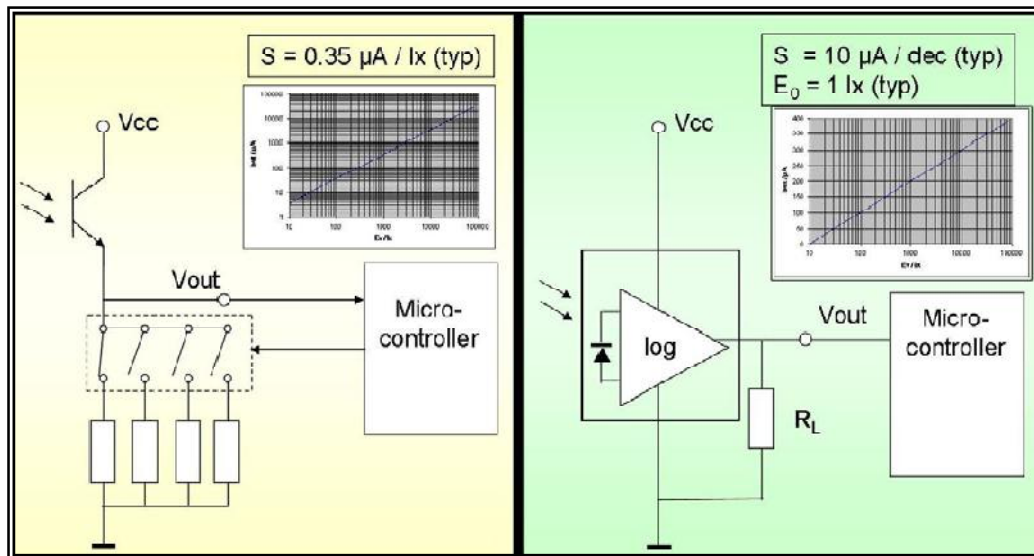


Figura 3.5. Un detector de salida lineal (izquierda) y uno de salida logarítmica (derecha) son empleados para detectar la iluminación ambiente. Para alcanzar una resolución suficiente sobre el rango de medición, el rango operativo del detector lineal es ajustado utilizando distintas resistencias (Osram, 2006).

3.4. Sistema de monitorización de variables lumínicas

Para justificar la implementación de un sistema de iluminación regulable, es necesario conocer la aportación de luz natural que de manera gratuita nos ofrece el medio ambiente, para ello, se tomaron lecturas de niveles de iluminación presentes en distintos puntos tanto al interior y al exterior de los salones de clases, estos puntos fueron seleccionados de acuerdo a la distribución normal de los usuarios del edificio, y a la altura del área de trabajo, es decir, a la altura de los escritorios. Para hacer esta prueba, se consideró más que suficiente el tomar lecturas en 12 puntos al interior del edificio distribuidos de la forma en que se ilustra en la Figura 3.6. a).

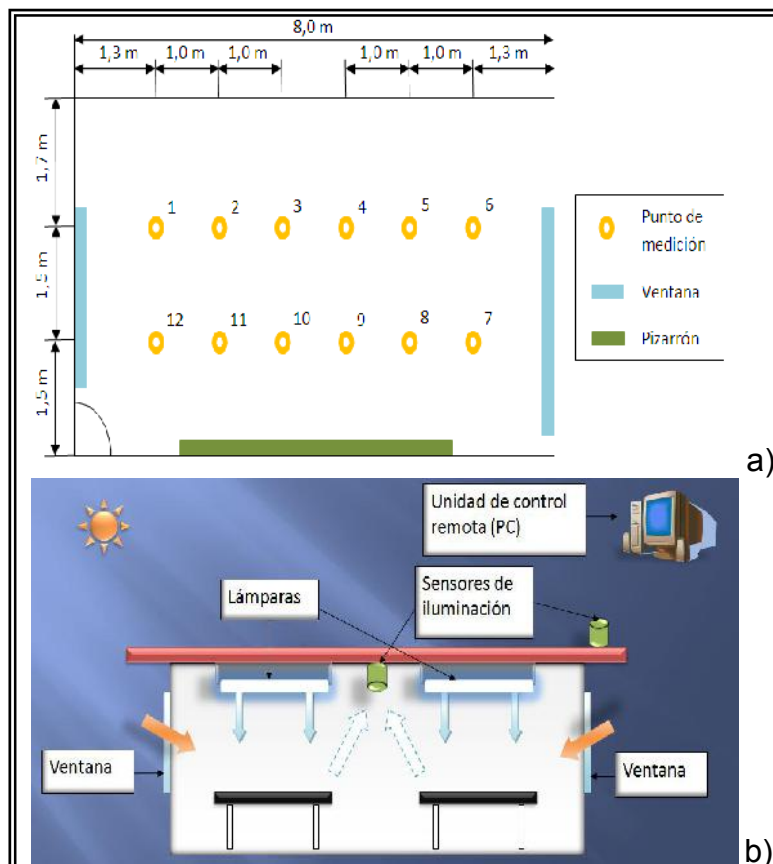


Figura 3.6. Ubicación de los sensores. a) Muestra la distribución de los sensores ubicados en el área de trabajo al interior del edificio (sensores del 1 al 12). b) Muestra el sensor número 13 colocado en el interior (ubicado en el techo del salón), así como también el sensor ubicado en el exterior del salón.

El sistema desarrollado fue empleado para monitorear de manera remota y automática los distintos niveles de iluminación registrados en puntos estratégicos al interior de un salón de clase, así como también, la intensidad lumínica observada al exterior del edificio. El sistema en total cuenta con 14 distintos puntos de medición, 13 de ellos ubicados al interior del salón y uno en el exterior (ver Figura 3.6).

Como podemos ver en la figura anterior, es de esperarse que se disponga de una mayor iluminación en los puntos que se encuentran cercanos a las ventanas, en especial los puntos cercanos a la puerta, esto debido a que en el lado opuesto a la puerta del salón, se encuentran una serie de árboles que obstaculizan de cierta manera el paso de la luz natural al interior del edificio.

Para llevar a cabo la monitorización y registro de los niveles de iluminación en todos los puntos propuestos, se realizó un sistema digital de comunicación el cual se esquematiza en la Figura 3.7.

Donde el microcontrolador maestro (MCU_MST) es un sistema digital maestro que se encarga de coleccionar el estado actual de todos los sensores disponibles en el sistema de monitorización. Para realizar esta tarea MCU_MST dispone de una interfaz inalámbrica de radio frecuencia, con la cual se comunica con una serie de sistemas digitales esclavos denominados MCU_SLVX, los cuales se encuentran distribuidos al interior y exterior del edificio y tienen acceso directo a los sensores de luz de día SFH5711 empleados para la monitorización; de esta manera, MCU_SLV1 y MCU_SLV2 tienen acceso a los sensores mostrados en la Figura 3.6, mientras que MCU_SLV3 y MCU_SLV4 tienen acceso a los sensores utilizados para monitorizar la iluminación interna y externa (Figura 3.2).

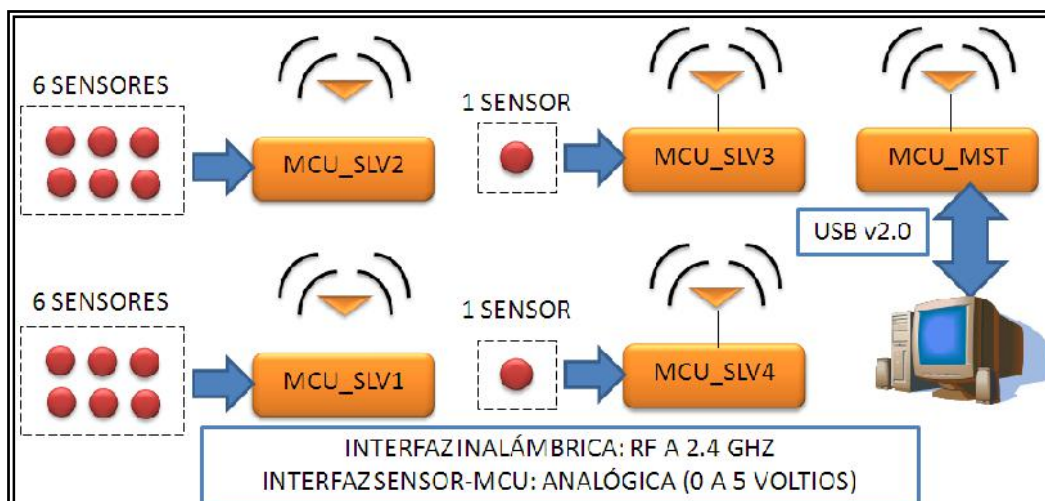


Figura 3.7. Sistema para la monitorización de los niveles lumínicos de interés.

Para describir la instrumentación, el sistema lo podemos dividir en etapas tales como interfaz con la PC, comunicación inalámbrica y proceso de comunicación las cuales se detallan a continuación.

3.4.1. Interfaz con la PC

La interfaz de comunicación con la PC empleada fue el estándar USB 2.0; para instrumentarlo, se utilizó un microcontrolador PIC18f4550 de la empresa Microchip, el cual incluye la comunicación USB versión 2.0. Una característica particular por la cual se eligió este microcontrolador, es que dispone del hardware requerido para realizar este tipo de comunicación; cabe resaltar, que cuenta con la posibilidad de trabajar al mismo tiempo con dos señales independientes de reloj, una señal para la CPU del microcontrolador, y otra para el hardware encargado de la interfaz USB.

Por su parte, en la PC se desarrolló una aplicación en lenguaje de programación C#, esto debido a que se encuentran disponibles controladores de manera gratuita para realizar la comunicación con el microcontrolador seleccionado, además de que es un lenguaje de programación que no requiere el pago de licencia.

3.4.2. Comunicación inalámbrica

Para poder realizar un análisis del confort lumínico, es necesario medir el comportamiento de iluminación natural presente tanto al interior como al exterior de los salones de clase, al igual que en edificios u oficinas, así como también la luz artificial que entregan las luminarias. Estas mediciones requieren se realicen en diferentes puntos simultáneamente y en múltiples ocasiones con un amplio rango de medición y con una buena precisión. Es por ello, que al realizar la transferencia de datos a la PC remota se realizó de manera inalámbrica, con la finalidad de poder tener flexibilidad en la adquisición de los datos además de facilitar la instalación y desinstalación del sistema.

La comunicación inalámbrica implementada fue mediante radio frecuencia; para ello, fueron empleados módulos transceptores TRF-24G de Laipac Technology. Los transceptores TRF-24G nos brindan grandes ventajas las cuales se pueden enlistar:

- Operan en un rango de frecuencia de 2.4 y 2.524 GHz.
- Brindan la posibilidad de transmitir en 125 distintos canales.
- Permiten realizar una comunicación bi-direccional a una tasa de transferencia que puede variar entre los 250Kbps y 1Mbps.
- Permiten transferir de manera automática.
- Utilizan técnicas para la detección de errores (CRC código de redundancia cíclica) disponibles en el dispositivo.

Finalmente, la implementación e instalación del sistema de monitorización es mostrado en la Figura 3.8.

3.4.3. Proceso de comunicación

En una primera instancia, la PC envía la orden ó comando al microcontrolador ubicado dentro de MCU_MST (Figura 3.7) de que se realice la captura de los niveles de iluminación presentes en los puntos de medición seleccionados, lo que hace MCU_MST es enviar de manera inalámbrica dicho comando al resto de los microcontroladores del sistema (MCU_SLV1, MCU_SLV2, MCU_SLV3 y MCU_SLV4). Una vez transcurrido el tiempo considerado para la adquisición de datos, la PC envía un nuevo comando a MCU_MST solicitando la información colectada por microcontroladores, nuevamente se envía la petición de manera inalámbrica pero esta vez se obtiene una por parte de cada microcontrolador con el resultado de las distintas lecturas realizadas.

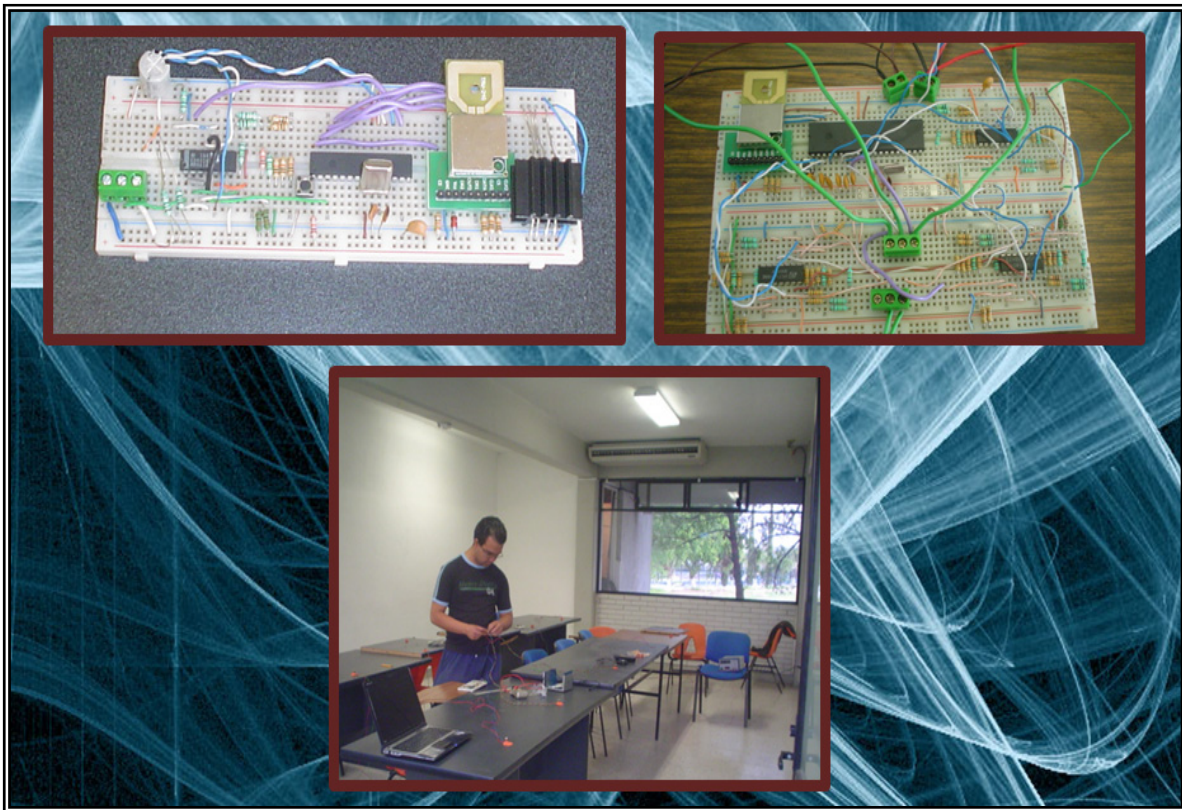


Figura 3.8. Instalación del sistema de monitorización lumínica.

El almacenamiento de la información colectada de los por el sistema de monitorización es realizado en una computadora personal ubicada en el cuarto de control (ver

Figura 3.1), la ventana principal de la interfaz de usuario se muestra en la Figura 3.9, esta es una aplicación desarrollada en el lenguaje de programación C# la cual nos permite visualizar en tiempo real el estado de cada uno de los sensores instalados, así como también registrar en un archivo de texto el historial de las distintas lecturas registradas por los sensores con el paso del tiempo. La interfaz de usuario desarrollada tiene la opción de visualizar el historial de un día seleccionado mediante gráficos de barras o de líneas (ver Figura A.1).



Figura 3.9. Ventana principal de la interfaz de usuario del sistema de monitorización.

3.5. Sistema de iluminación regulable basado en lógica difusa

En este control la potencia de los balastos es reguladas de tal manera en que puedan suministrar los niveles de iluminación necesarios para mantener las

condiciones de iluminación y confort óptimas (200 a 500 lx); la acción de control es tomada con base en lógica difusa, donde las entradas al controlador son la iluminación interna (E_{int}) y externa del edificio (E_{ext}) (ver Figura 3.2), con base a éstas se toma la acción de control sobre el porcentaje de activación de los balastos (Lamp) al interior del salón de clases tal y como se aprecia en la Figura 3.10.

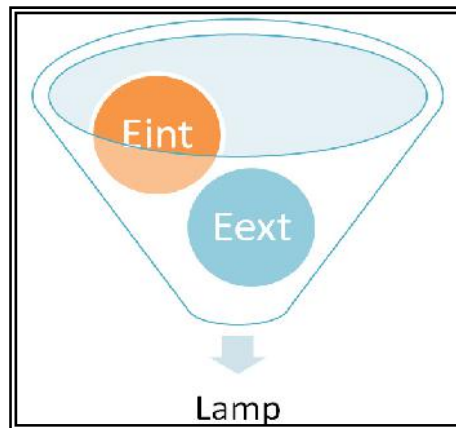


Figura 3.10. Representación del filtro basado en lógica difusa del regulador propuesto.

3.6. Cuantificando el ahorro energético

Para cuantificar el ahorro energético, se realizaron una serie de registros del consumo energético en el salón de clases, dichos consumos se definen como sigue.

3.6.1. Consumo en operación convencional

Se denomina consumo en operación convencional al medido cuando las luces son operadas de forma normal por los usuarios por medio del interruptor de encendido-apagado del salón. En este modo de operación, cabe señalar que se presentan muchos casos en los que se activa la luz aun sin ser requerida, esto debido a la presencia de luz natural al interior del salón o debido a que el salón se encuentra desocupado, lo cual representa un gasto innecesario debido a

condiciones de operación ineficientes, el consumo de energía eléctrica aquí descrito puede ser definido mediante (20).

$$P(t) \begin{cases} 100\% & E_{\text{media}} \leq E_{\text{confortable}} \\ 0\% & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (20)$$

Donde:

$P(t)$ es la potencia suministrada a través del tiempo;

E_{media} es la iluminación media al interior;

$E_{\text{confortable}}$ es la iluminación confortable al interior.

3.6.2. Consumo con control horario (encendido-apagado automático)

En este caso, se realiza un corte en el suministro energético de acuerdo a un horario prefijado. Esto es, los usuarios pueden realizar operaciones de encendido-apagado de las luces en forma normal solo en aquellos horarios aceptados en la programación. Fuera de este horario, el suministro de energía es desactivado para evitar gasto de energía en el caso que los usuarios del salón hayan olvidado apagar las luces. La acción de control en este caso, se encuentra determinada por la siguiente ecuación.

$$P(t, H) \begin{cases} 100\% & 6:30\text{hrs} \leq t \leq 10:00\text{hrs} \wedge H = HV \\ 100\% & 18:00\text{hrs} \leq t \leq 22:30\text{hrs} \wedge H = HV \\ 0\% & \text{de otra manera} \wedge H = HV \\ 100\% & 6:30\text{hrs} \leq t \leq 9:00\text{hrs} \wedge H = HI \\ 100\% & 17:00\text{hrs} \leq t \leq 22:30\text{hrs} \wedge H = HI \\ 0\% & \text{de otra manera} \wedge H = HI \end{cases} \quad (21)$$

Donde $P(t, H)$ es la potencia de las lámparas en función del tiempo y del horario, HV es horario de verano, y HI es horario de invierno.

3.6.3. Consumo con control de intensidad regulable automático

En este caso además de realizarse un encendido-apagado automático del suministro energético, los balastros son operados de tal manera en que puedan suministrar el porcentaje de iluminación necesario para mantener las condiciones de iluminación y confort óptimas, en este caso, la acción de control es tomada con base en lógica difusa.

Capítulo 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Monitorización lumínica

Con el sistema de monitorización lumínico descrito en el capítulo previo pudimos registrar simultáneamente los niveles de iluminación tanto al interior como al exterior del edificio. Para calibrar el controlador basado en lógica difusa, es necesario conocer la dinámica en los niveles de iluminación, así como también, conocer la influencia en los niveles de iluminación que tienen las lámparas con las que se encuentra equipado el edificio, para de esta manera tomar la acción correctiva que se debe tomar para garantizar las condiciones de iluminación requeridas por el estándar internacional IEC-12464.

4.2. Aportación lumínica de las lámparas

Para conocer la influencia de las lámparas en los puntos internos de interés, fue realizada una medición del nivel lumínico debido sólo a las fuentes de iluminación presentes en el interior del edificio, es decir, la medición fue realizada en ausencia de luz natural, con lámparas encendidas, persianas y puerta cerrada (ver Figura 4.1).

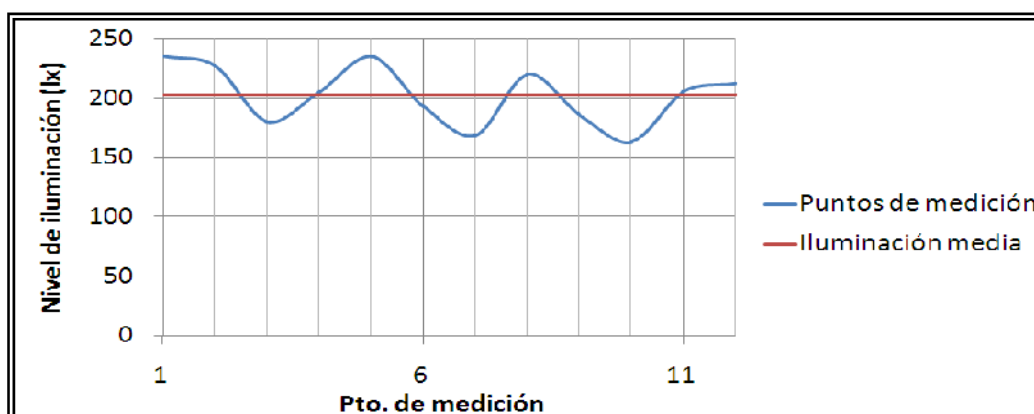


Figura 4.1. Iluminación del salón 21 con ausencia de luz natural, lámparas encendidas, persianas y puerta cerradas.

4.2.1. Aportación lumínica de la luz natural

Para visualizar la dinámica de la luz natural, así como una relación entre todos los puntos de interés, se llevo a cabo el registro de los niveles de iluminación observados a lo largo de un día normal de clase en los puntos de medición propuestos (ver Figura 4.2).

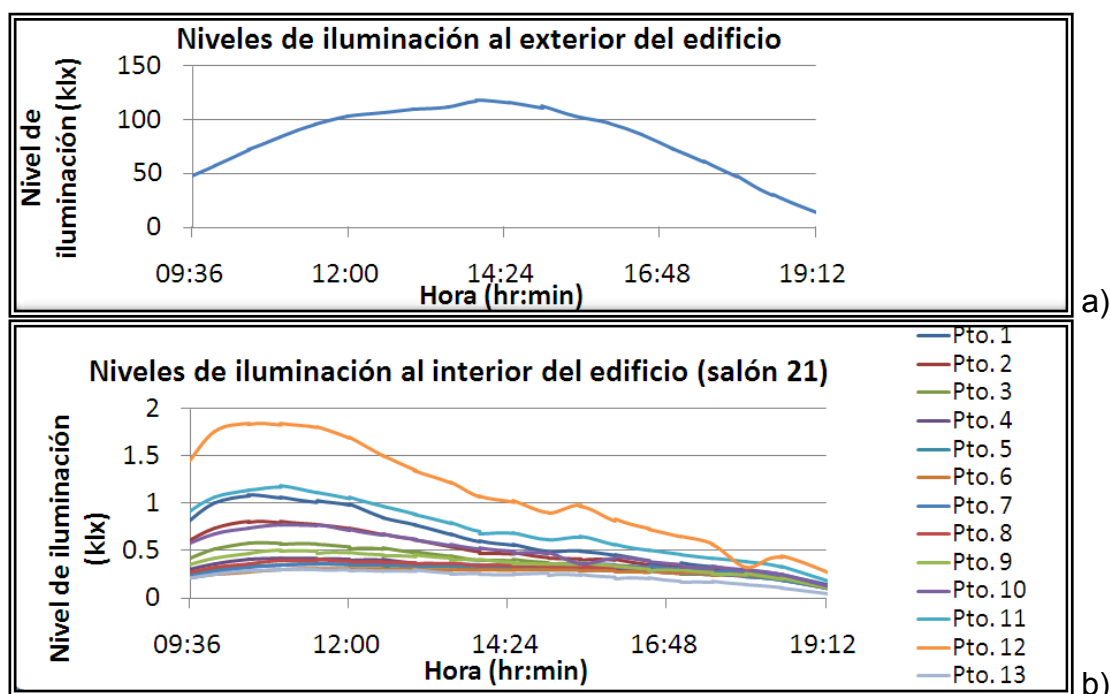


Figura 4.2. Mediciones hechas el 1 de mayo de 2008. a) Niveles observados al exterior del edificio. b) Niveles observados al interior del edificio.

Para garantizar un nivel de iluminación confortable, lo que nos interesa mantener constante o garantizar un nivel mínimo de iluminación media observado en el área de interés (señales Pto. 1 a Pto.13 de la Figura 4.2), de acuerdo a la norma IEC-12464, el nivel de iluminación recomendable para un salón de clases debe encontrarse en el rango de 200 a 500 lx.

La Figura 4.2 nos permite visualizar la no linealidad del sistema que pretendemos controlar, puesto que para un mismo nivel de iluminación exterior

observado en la mañana y la tarde, no se observa el mismo nivel de iluminación al interior del edificio, esto es debido a la orientación del edificio respecto al sol, por la mañana los rayos de sol inciden de manera directa en las ventanas que están en la vista sur del edificio incrementando de manera directa el nivel de iluminación medio al interior del edificio, este fenómeno no ocurre de la misma manera al atardecer ya que predomina en el interior la iluminación producto de la reflexión del exterior sobre la iluminación por transmisión directa de los rayos solares.

Esto se aprecia de mejor manera en Figura 4.3 donde se muestra la iluminación promedio al interior del edificio en el área de interés, podemos ver que la pendiente con la que cambia el nivel medio de iluminación es mayor por la mañana que el observado por la tarde.

Como podemos ver en la Figura 4.3, durante un 80% de un día normal de clases, al interior del salón de clase se observaron niveles de iluminación promedio superiores al umbral de la zona de confort visual establecida en la norma IEC-12464.

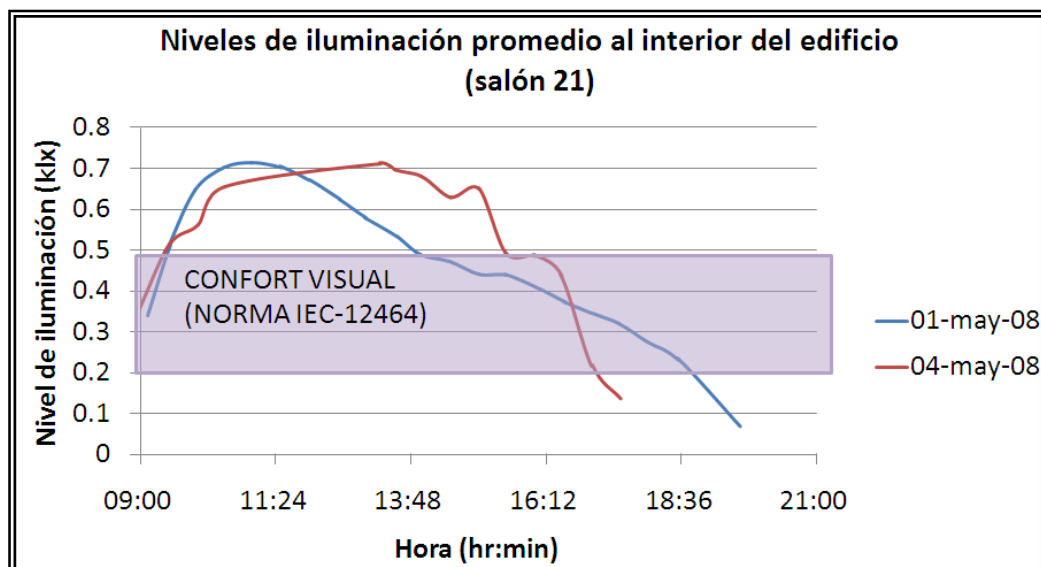


Figura 4.3. Niveles de iluminación promedio al interior del edificio y la zona de confort visual que establece la norma IEC-12464.

4.3. Calibración del controlador basado en lógica difusa

Como entradas al controlador fueron propuestos el nivel de iluminación interna (E_{int}) y externa (E_{ext}) del edificio. Luego de observar la dinámica en los niveles de iluminación exterior, interior, y promedio en el área de interés (ver Figura 4.2), el observador o experto comienza a establecer expresiones lingüísticas a los distintos valores que pueden tomar las entradas del sistema, así como también, expresiones para referirse a la intensidad de la salida. En trabajos similares a este son establecidas 3 conjuntos difusos para cada una de las entradas y salidas del sistema (Kolokotsa, et al., 2006; Kovacic, et al., 2006). Para el presente trabajo son propuestos 5 (Bajo, Medio Bajo, Medio, Medio Alto y Alto).

Como parte del proceso de fusificación y defusificación, luego de observar el rango en el que varían las entradas y salida del controlador, los conjuntos difusos propuestos fueron asociados a las expresiones lingüísticas tal como se aprecia en las Figura 4.4 a 4.6.

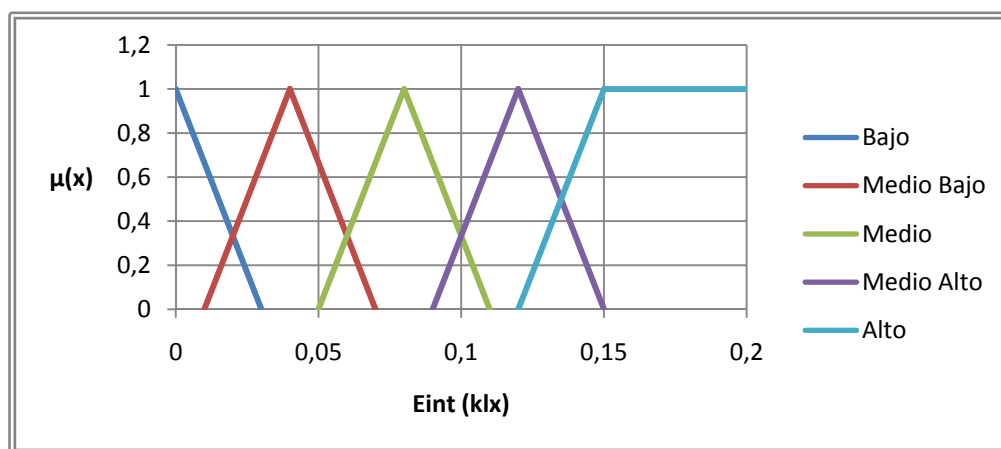


Figura 4.4. Conjuntos difusos para la iluminación interna.

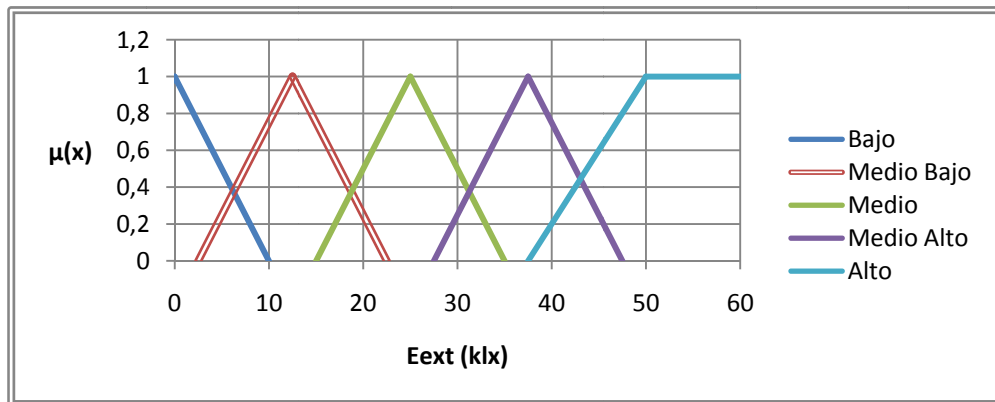


Figura 4.5. Conjuntos difusos para la iluminación externa.

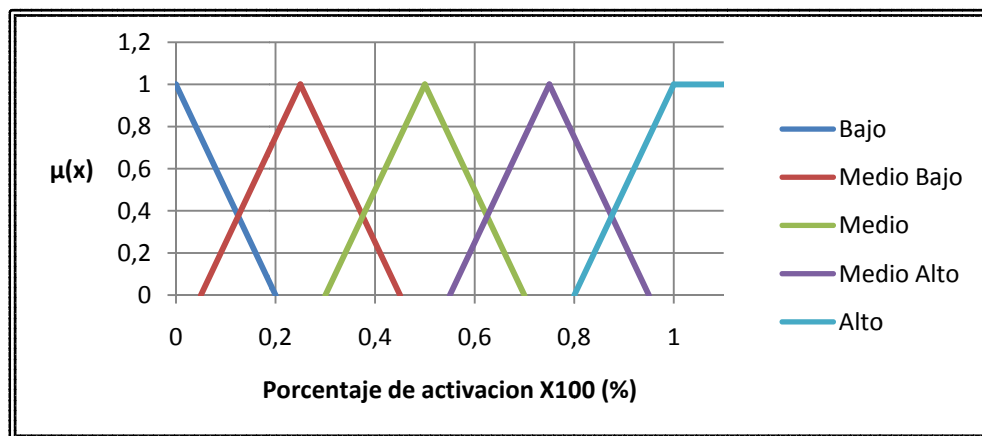


Figura 4.6. Conjuntos difusos para la activación de los balastos.

Finalmente, con base en el estándar internacional de iluminación IEC-12464 se establece que dentro del salón de clases se requieren niveles de iluminación promedio en el rango de 200 a 500 lx. Tras haber observado la dinámica debida a la luz natural en el comportamiento de los niveles de iluminación interior, exterior y promedio en el área de interés, así como la influencia de las luminarias en los puntos de medición, fueron planteadas una serie de reglas de inferencias para determinar el porcentaje en que deben ser activadas las lámparas para garantizar niveles mínimos de iluminación que entren en el rango establecido por la norma (ver Cuadro A.1). La superficie de respuesta del controlador generada se aprecia en la Figura 4.7.

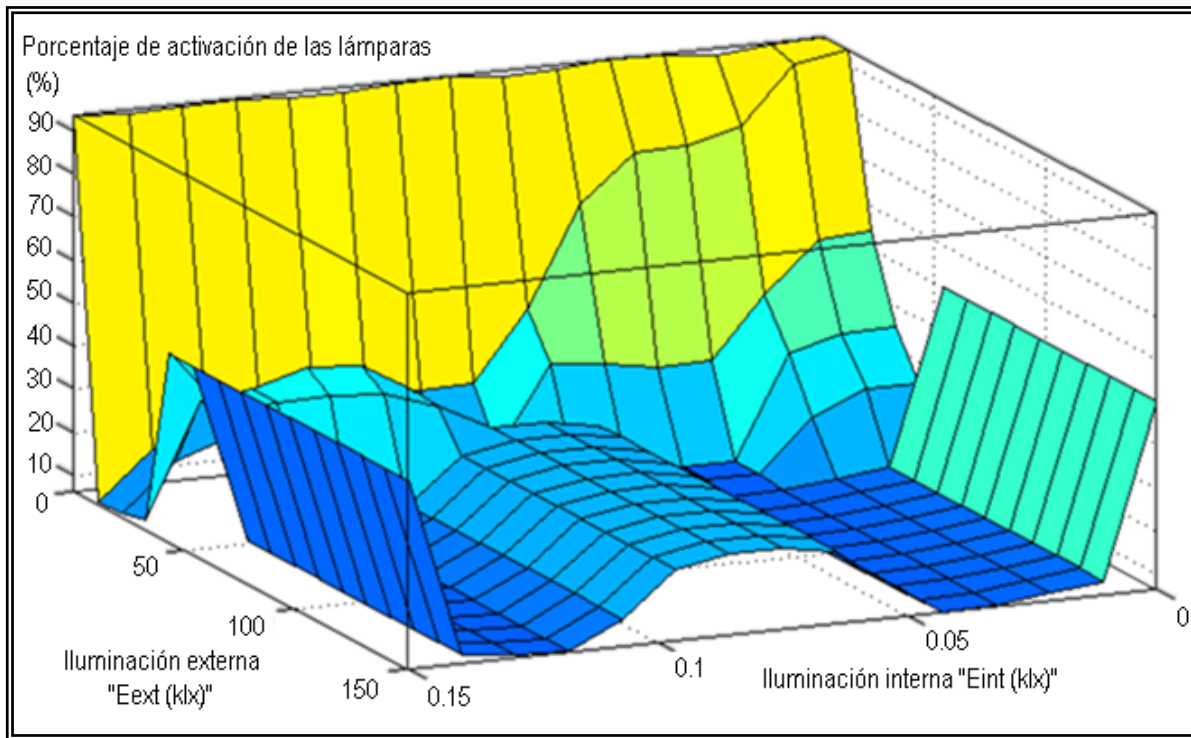


Figura 4.7. Superficie de control que mapea la iluminación interna (E_{int}) y la externa (E_{ext}) con un porcentaje de activación de las luminarias.

En la Figura 4.7 podemos observar un gráfico que nos permite visualizar la respuesta del controlador ante distintos valores observados en las entradas del regulador, por ejemplo para una iluminación externa entre 0 y 0.5 klx con una iluminación externa en el rango de 0 a 50 klx son indicadores de una considerable ausencia de luz natural es decir, es muy temprano o muy tarde, en estas circunstancias las lámparas tienen que estar prácticamente encendidas al 100%, por esta razón, la superficie de respuesta que se encuentra asociada a estos valores de entradas se encuentra en el nivel más alto de la gráfica.

4.4. Respuesta del sistema automático regulable basado en lógica difusa

Para evaluar la respuesta del controlador basado en lógica difusa, se llevó a cabo la monitorización de la iluminación debida a la luz natural en el horario de las 8:00 a las 22:00 hrs, por otro lado, se cuantificó la influencia de la luz artificial en cada uno de los puntos de medición. Con esta información y el controlador

difuso descrito en la sección previa, por medio de simulación, la respuesta del controlador presenta la dinámica observada en la Figura 4.8.

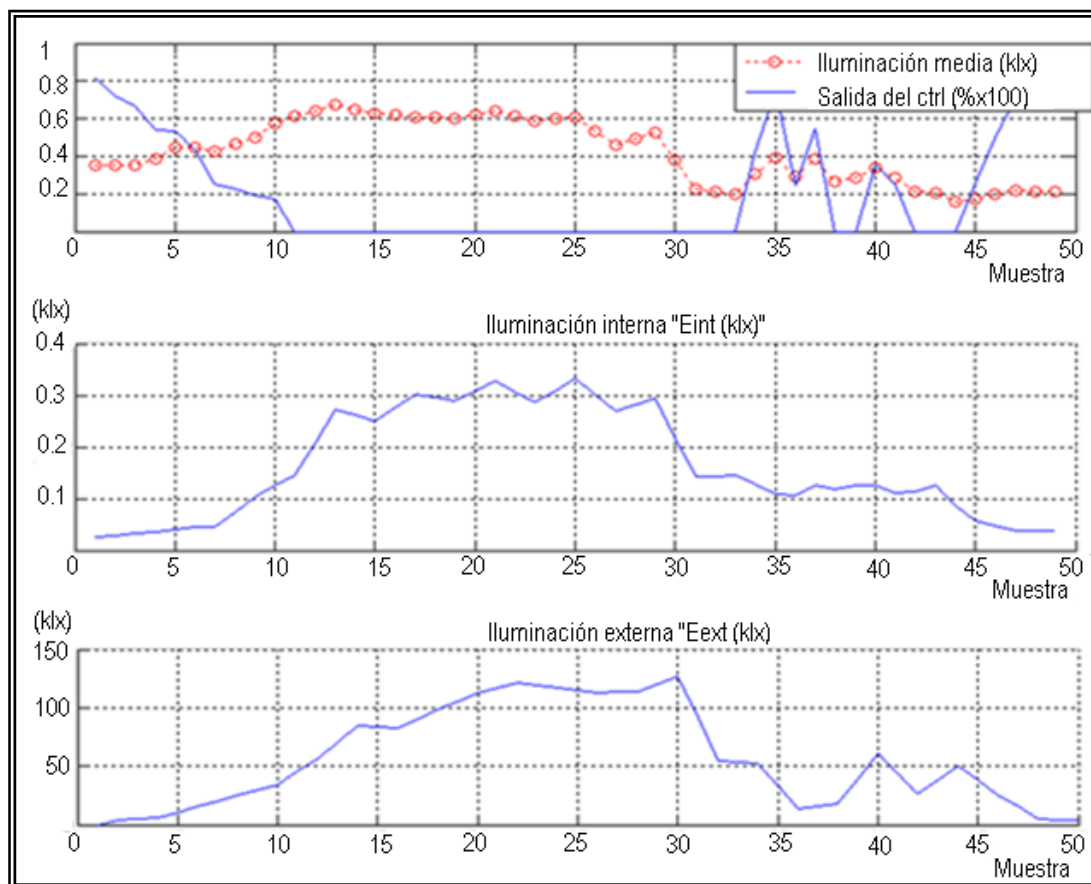


Figura 4.8. Respuesta del controlador regulable observada a lo largo de un día normal de clases (8:00 a 22:00 hrs).

De acuerdo al estándar IEC-12464, con el controlador difuso son garantizados niveles de iluminación media en el área de interés en el rango de 200 a 500 lx.

4.5. Evaluación de los sistemas de iluminación propuestos

Para evaluar el desempeño de los sistemas de iluminación propuestos en la sección, fue monitoreado (consumos debidos a la operación convencional y al control horario) y simulado (consumo debido al control regulable) durante una semana en el salón de pruebas (salón 21 del edificio de posgrado ver Figura 3.1),

respecto a la carga eléctrica correspondiente a este salón consideremos el consumo de energía eléctrica debido a 8 lámparas tubulares fluorescentes de 32 W y a 4 balastos que las controlan, lo que representa una carga de aproximadamente 250 w apreciable claramente en las Figura 4.9 y Figura 4.10 donde las lámparas solo tienen 2 estados de activación 0 ó 100%, a diferencia de la Figura 4.11 donde la carga eléctrica del sistema es variante en función de la acción correctiva del controlador difuso.

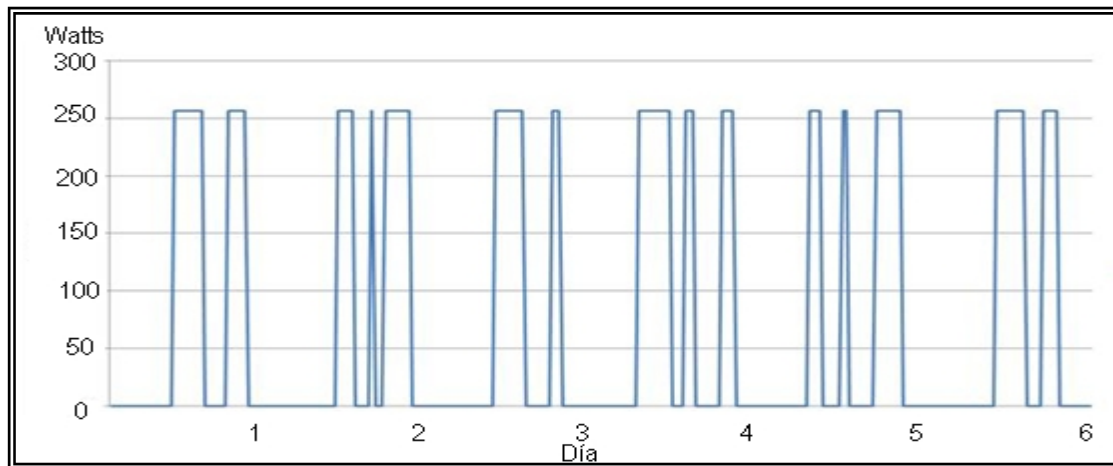


Figura 4.9. Consumo eléctrico observado en el consumo convencional.

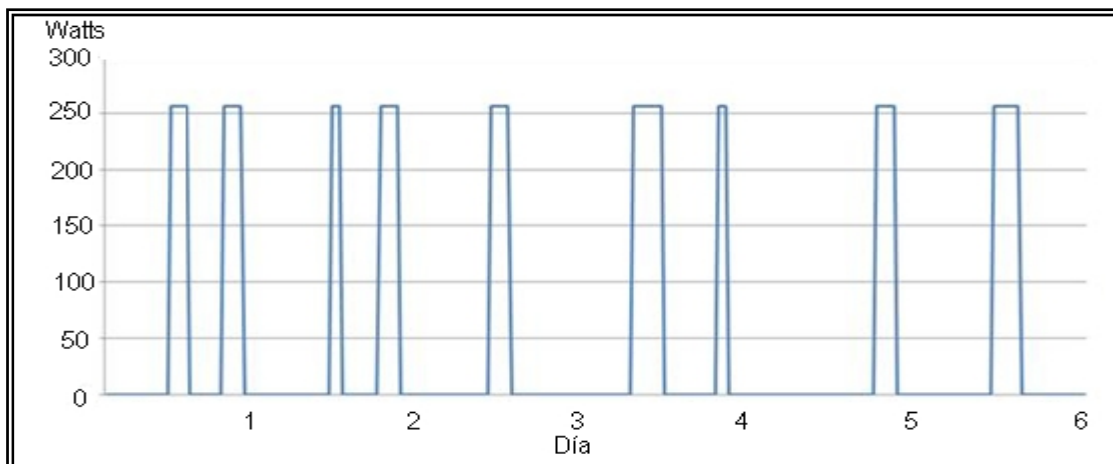


Figura 4.10. Consumo eléctrico con el control horario.

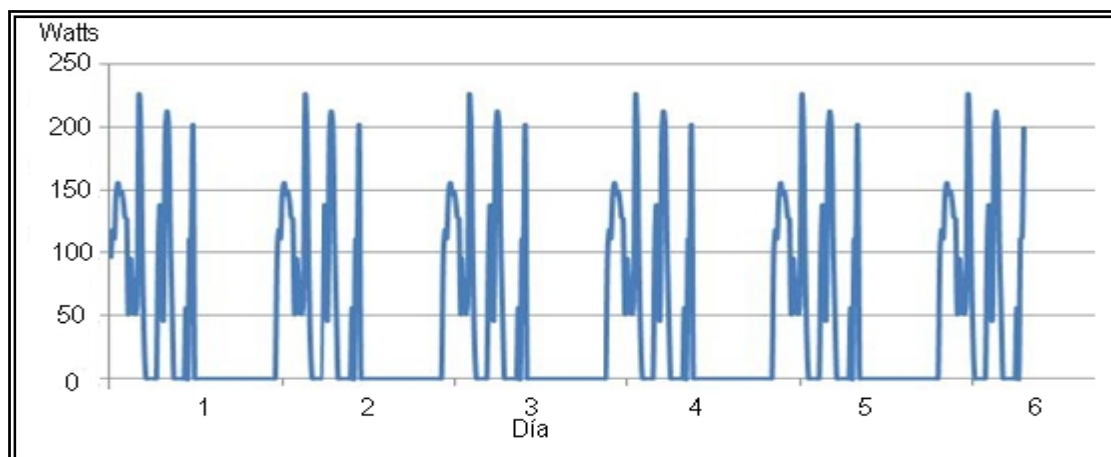


Figura 4.11. Consumo eléctrico con el control difuso.

Finalmente, al comparar el consumo eléctrico de los sistemas de iluminación evaluados, se toma como valor de referencia el sistema de control horario, esto debido a que es el que actualmente se encuentra implementado en el edificio. El resultado de la comparativa se muestra en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Comparativa de los sistemas de iluminación evaluados.

Sistema de iluminación	Consumo de energía eléctrica (kWh)	Relación de consumo respecto al control horario	Ahorro (%)
Operación convencional	11.008	1.620	-62
Control horario	6.784	1.000	0
Control regulable automático	2.93	0.405	59.5

Recordemos que inicialmente el edificio se encontraba equipado con lámparas F96T12/D, las graficas de consumo mostradas en las Figura 4.9 y Figura 4.11 representan el consumo de las lámparas F32T8/TL82 utilizadas para realizar el control regulable, por último consideremos que actualmente están entrando al mercado lámparas de mayor eficiencia que las fluorescentes, me refiero a las lámparas de LED's, un modelo que de este tipo de lámpara que se puede utilizar en la presente aplicación es el FLLT8/600, las características de estos 3 modelos

de lámparas disponibles se muestran en el Cuadro 4.2. Como podemos ver, el modelo de lámpara de LED's presenta una eficiencia energética significativa comparada con el modelo de lámpara F96T12/D instalado prácticamente en todos los salones de clases, pasillos y oficinas administrativas de la Facultad de Ingeniería de la UAQ.

Con las mediciones del consumo eléctrico registrados por el uso de las lámparas F32T8/TL84 en un salón de clases y conociendo la relación de carga que representa cada una de los modelos de luminarias mostrados en el Cuadro 4.2, fue estimado el consumo energético resultante al utilizar cada uno de estos

Cuadro 4.2. Luminarias disponibles para la presente aplicación.

Modelo de luminaria	F96T12/D	F32T8/TL84	FLLT8/600
Diámetro (in)	1 ½	1	1
Longitud (in)	96	48	48
Flujo luminoso medio (lm)	5200	3000	7051
Vida media (hr)	12000	20000	50000
Temperatura de color (°K)	6250	4100	3000 / 5500
Índice de rendimiento de color	79	85	---
Potencia (W)	75	32	9

modelos de lámparas, tal proyección se aprecia en el Cuadro 4.3, donde podemos apreciar que con el tipo de lámpara F96T12/D no aplica (N/A) el control regulable automático, puesto que el balastro que controla esta luminaria es del tipo electromagnético y no permite regular la intensidad o potencia de activación de la lámpara, de esta manera al renovar el tipo de lámpara F96T12/D por lámparas de mayor eficiencia energética como los modelos de luminaria F32T8/TL84 y FLLT8/600, además de lograr un ahorro significativo por el simple hecho de hacer el cambio de luminarias, éstos dos últimos tipos de lámparas nos permiten una mayor flexibilidad al tener la posibilidad de implementar estrategias de control

donde regulemos la potencia de activación de las luminarias, aumentando de esta manera el ahorro energético.

Con base en el precio medio de la energía eléctrica facturada a la FI de la UAQ durante el pasado año 2008 (ver Cuadro 1.6), nos permite cuantificar el impacto económico que representaría el consumo eléctrico por semana debido a los distintos modos de operación y tipos de luminarias propuestos, tal como se aprecia en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Consumo eléctrico semanal debido a los modelos de luminarias sugeridos.

Operación del sistema de iluminación	Tipo de luminaria	Consumo eléctrico semanal por salón (kWh)	Consumo eléctrico semanal por salón (\$ MN)	Ahorro (%)	Ahorro (\$ MN)
Operación convencional	F96T12/D	25.800	39.632	0.000	0.000
Control horario	F96T12/D	15.900	24.425	38.372	15.208
Control automático regulable	F96T12/D	N/A	N/A	N/A	N/A
Operación convencional	F32T8/TL84	11.008	16.910	57.333	22.723
Control horario	F32T8/TL84	6.784	10.421	73.705	29.211
Control automático regulable	F32T8/TL84	2.927	4.496	88.655	35.136
Operación convencional	FLLT8/600	1.548	2.378	94.000	37.254
Control horario	FLLT8/600	0.954	1.465	96.302	38.167
Control automático regulable	FLLT8/600	0.412	0.632	98.405	39.000

Con la información de el cuadro anterior fue realizada una proyección para estimar el impacto energético y económico que representarían cada una de

las alternativas de ahorro sugeridas por salón de clases al año, tal pronóstico se muestra en el Cuadro 4.4.

Cuadro 4.4. Consumo eléctrico anual por salón debido a los distintos tipos de lámparas propuestos.

Operación del sistema de iluminación	Tipo de luminaria	Consumo eléctrico anual por salón (kWh)	Consumo eléctrico anual por salón (\$ MN)	Ahorro (%)	Ahorro (\$ MN)
Operación convencional	F96T12/D	1238.400	1902.353	0.000	0.000
Control horario	F96T12/D	763.200	1172.380	38.372	729.973
Control automático regulable	F96T12/D	N/A	N/A	N/A	N/A
Operación convencional	F32T8/TL84	528.384	811.670	57.333	1090.682
Control horario	F32T8/TL84	325.632	500.216	73.705	1402.137
Control automático regulable	F32T8/TL84	140.496	215.821	88.655	1686.532
Operación convencional	FLLT8/600	74.304	114.141	94.000	1788.212
Control horario	FLLT8/600	45.792	70.343	96.302	1832.010
Control automático regulable	FLLT8/600	19.757	30.350	98.405	1872.003

En la FI se cuenta con 6 edificios que tienen salones de clase similares al salón de clase donde fue realizado el presente estudio (ver Figura 4.12), los cuales cuentan con un total de 27 salones.

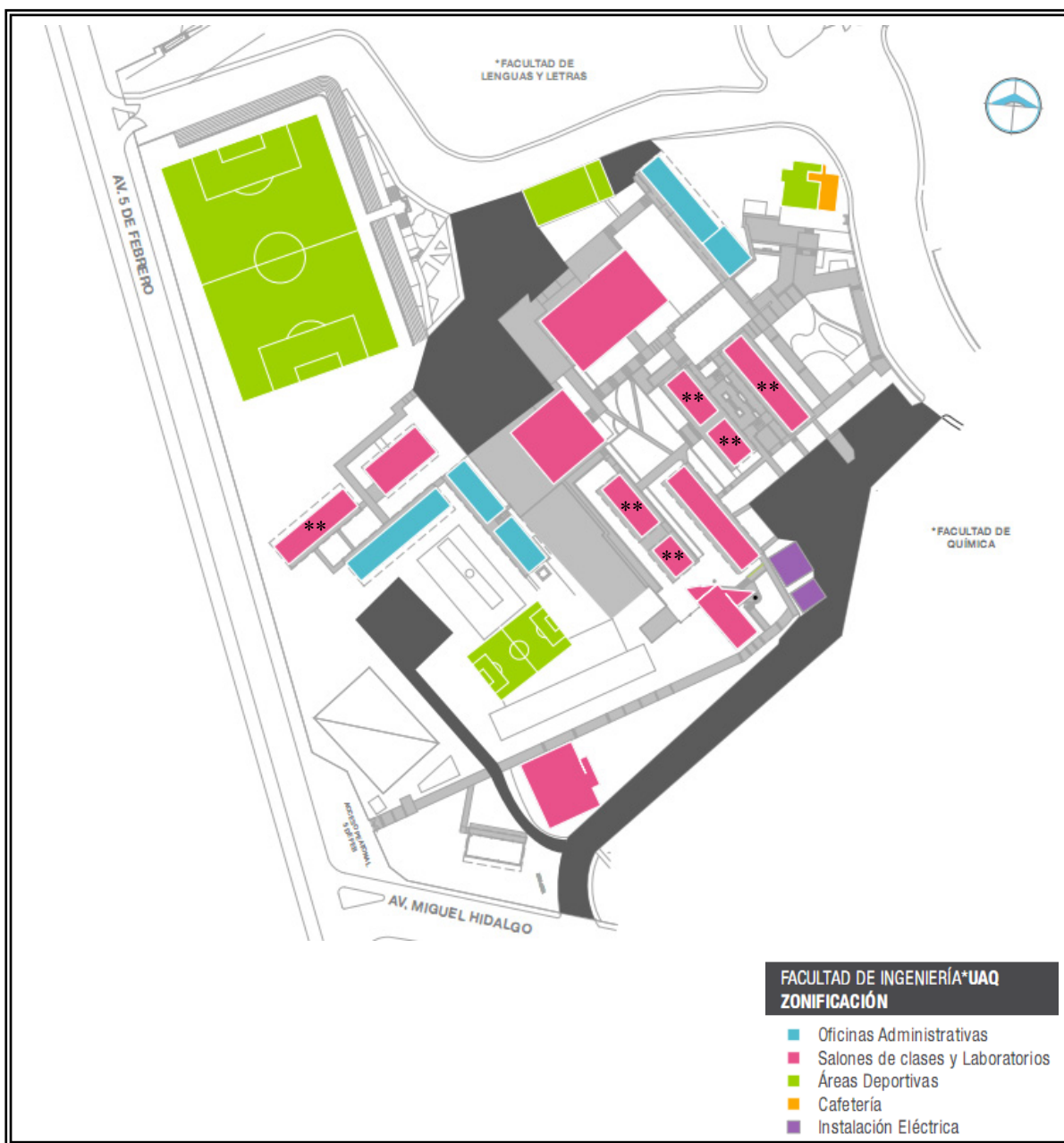


Figura 4.12. Zonificación de la FI de la UAQ. Los edificios marcados con ** son salones de clase con características similares al salón de pruebas.

Tomando en consideración lo anterior, se estimó el impacto energético y económico que representaría la implementación de cada una de las alternativas de ahorro propuestas al implementarlas en los 27 salones de clase mencionados (ver Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Consumo eléctrico anual debido a los distintos tipos de lámparas propuestos al implementarlo en 27 salones de clase.

Operación del sistema de iluminación	Tipo de luminaria	Consumo eléctrico (kWh)	Consumo eléctrico anual (\$ MN)	Ahorro (%)	Ahorro (\$ MN)
Operación convencional	F96T12/D	33436.800	51363.522	0.000	0.000
Control horario	F96T12/D	20606.400	31654.264	38.372	19709.259
Control automático regulable	F96T12/D	N/A	N/A	N/A	
Operación convencional	F32T8/TL84	14266.368	21915.103	57.333	29448.419
Control horario	F32T8/TL84	8792.064	13505.819	73.705	37857.703
Control automático regulable	F32T8/TL84	3793.392	5827.172	88.655	45536.351
Operación convencional	FLLT8/600	2006.208	3081.811	94.000	48281.711
Control horario	FLLT8/600	1236.384	1899.256	96.302	49464.267
Control automático regulable	FLLT8/600	533.446	819.446	98.405	50544.076

Finalmente, recordemos que en el proceso de generación de energía eléctrica son producidos gases de efecto invernadero, de acuerdo a cálculos realizados por CarbonTrust y por las estimaciones realizadas en el presente trabajo, la Facultad de Ingeniería de la UAQ actualmente con el esquema de operación convencional y con las lámparas F96T12/D anualmente los salones de clase generan alrededor de 440 toneladas al año de CO₂, mientras con el esquema de control automático y las lámparas de LED's propuestas se estima que anualmente sean generadas menos de 8.8 toneladas de este gas.

Cuadro 4.6. Impacto ecológico anual debido a 27 salones de clases.

Sistema de iluminación	Tipo de lámpara	Generación de CO ₂ anual (ton)
Operación convencional	F96T12/D	18.34
Control regulable automático	FLLT8/600	0.29

NOTA: Los cálculos fueron realizados con la calculadora mexicana de carbono, <http://www.calculatusemisiones.com>

4.6. Discusión

La investigación sobre sistemas de iluminación ó de sombras normalmente se realiza sobre modelos a escala con los cuales se simula la dinámica de la luz natural mediante la creación de cielos artificiales (Aghemo, et al., 2008), acelerando de esta manera el tiempo requerido para evaluar la dinámica de los sistemas de iluminación, sin embargo esta metodología se tiende a realizar análisis sobre-estimados debido al tipo de ventanas, índices de reflectancia y errores de medición observados en el modelo (Thanachareonkit, et al., 2005). Dentro de trabajos de investigación de este tipo, para realizar la monitorización de variables lumínicas (como iluminación media sobre un área de trabajo, nivel de iluminación máximo y mínimo, uniformidad de la iluminación, índices de luz natural entre otros) son realizados muestreos multi-puntuales de forma manual (Krüger, et al., 2004; Thanachareonkit, et al., 2005; Cheng, et al., 2007), lo cual llega a ser una tarea un tanto laboriosa porque es necesario tomar lecturas con distintas condiciones lumínicas para poder comparar el desempeño de los sistemas de iluminación a evaluar.

4.7. Conclusiones

Se observó que al restringir el control a los usuarios, evitamos los desperdicios energéticos que se generan al hacer un mal uso de las lámparas. Las pruebas preliminares del sistema de control automático regulable muestran que es

posible lograr ahorros de energía eléctrica de alrededor de un 90% en cuanto a iluminación se refiere, además de que se garantizan niveles de iluminación que caen dentro de la zona de confort establecida en norma (UNE-EN 12464). Con el sistema propuesto se cumple con las características de un EI ya que al administrar la potencia de las luminarias se logra un uso óptimo de la energía, disminuyendo de esta forma los costos de operación del edificio y al mismo tiempo, se garantiza un nivel lumínico medio al interior del edificio suficiente para ofrecer un ambiente visual confortable.

Para el presente trabajo de investigación, fue desarrollado un sistema de monitorización multi-puntual de variables lumínicas, lo cual automatiza la tarea realizada en trabajos similares mencionados hasta el momento; además, tomando en cuenta el potencial del procesamiento de imágenes para este fin, durante el desarrollo del actual proyecto de investigación se han iniciado estudios para realizar la misma monitorización de variables lumínicas realizado pero esta vez mediante procesamiento de imágenes, lo cual es una herramienta que facilita las tareas de investigación desarrollada en sistemas de iluminación y hoy en día han despertado el interés de la comunidad científica alrededor del mundo. Los resultados encontrados hasta el momento muestran la viabilidad para desarrollar esta novedosa herramienta, lo cual permitirá ofrecer una metodología para realizar la monitorización de variables lumínicas para realizar labores de investigación y control sobre sistemas de iluminación.

4.8. Trabajos futuros

En el presente trabajo de investigación es propuesto un sistema de iluminación automático regulable, el cual sólo garantiza que en horas hábiles el interior del edificio cuente con un nivel de iluminación mínimo promedio requerido por normas para asegurar un confort visual, sin embargo, el control de iluminación excedente proveniente del exterior del edificio no es contemplada en la presente propuesta.

Por esta razón queda pendiente realizar un control de sombras que trabaje en conjunto con el sistema de iluminación propuesto en el presente trabajo; de esta manera, se garantiza que al interior del edificio se cuente en todo momento con una iluminación promedio dentro de un rango determinado sin importar las condiciones de iluminación externa. De esta forma limitamos la radiación que ingresa al interior del edificio a través de las ventanas, con lo que disminuimos la ganancia térmica.

Buscando el facilitar estas tareas, se han realizado estudios para emplear cámaras digitales con fines fotométricos, esta clase de estudios han permitido desarrollar técnicas que permitan evaluar índices de discomfort visual debido a brillos, así como también, se han desarrollado técnicas que permiten realizar mediciones goniofotométricas los cuales han permitido realizar instrumentos robustos que son capaces de realizar una reconstrucción tridimensional de la distribución lumínica al interior de un edificio, con lo cual se facilita la comparación de sistemas de iluminación.

REFERENCIAS

- Aghemo, C., Pellegrino, A., & LoVerso, V. (2008). The approach to daylighting by scale models and sun and sky simulators: A case study for different shading systems. *Building and Environment* , 43 (5), 917-927.
- Alcantara, E., Artacho, M., González, J., & García, A. (2005). Application of product semantics to footwear design. Part 1-identification of foot wear semantic space applying differential semantics. *International Journal of Industrial Ergonomics* , 35 (8), 713-725.
- Alcantara, E., Artacho, M., González, J., & García, A. (2005). Application of product semantics to footwear design. Part II-comparison of two clog designs using individual and compared semantic profiles. *International Journal of Industrial Ergonomics* , 35 (8), 727-735.
- Arkin, H., & Paciuk, M. (1997). Evaluating intelligent building according to level of service system integration. 6, 471-479.
- Babuska, R. (1998). *Fuzzy Modeling for Control*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Bahat, M., Inbar, G., Yaniv, O., & Schneider, M. (2000). A fuzzy irrigation controller system. 13, 137-145.
- Bergmann, A., Hanley, N., & Wright, R. (2006). Valuing the attributes of renewable energy investments. *Energy Policy* , 34 (9), 1004–1014.
- Bien, Z., Bang, W.-C., Kim, D.-Y., & Han, J.-S. (2002). Machine intelligence quotient: its measurements and applications. 127 (3-16).
- Blask, D., Sauer, L., Dauchy, R., Holowachuck, E., Ruhoff, M., & Kopff, H. (1999). Melatonin inhibition of cancer growth in vivo involves suppression of tumor fatty acid metabolism via melatonin receptor-mediated signal transduction events. *Cancer Research* , 59 (18), 4693-4701.
- Burton, S. (2001). Energy efficient office refurbishment.
- Chang, C.-C. (2008). Factors influencing visual comfort appreciation of the product form of digital cameras. *International Journal of Industrial Ergonomics* , 38 (11-12), 1007-1016.
- Cheng, C., Chen, C., Chou, C., & Chan, C. (2007). A mini-scale modelling approach to natural daylight utilization in building design. 42 (1), 372-384.

- Cheung, H., & Chung, T. (2008). A study on subjective preference to daylight residential indoor environment using conjoint analysis. *Building and environment* , 43, 2101-2111.
- Costantini, V., & Monni, S. (2008). Environment, human development and economic growth. *Ecological Economics* , 64 (4), 867-880.
- da Graca, V., Kowaltowsky, D., & Petreche, J. (2007). An evaluation method for school building design at preeliminary phase with optimisation of aspects environmental comfort for the school system of the State Sao Paulo in Brazil. *Building and environment* , 42 (2), 984-999.
- di Stefano, J. (2000). Energy efficiency and the environment: the potential for energy efficient lighting to save energy and reduce carbon dioxide at Melbourne University, Australia. *Energy* , 25, 823-839.
- Diedier, D., & Henri, P. (1980). *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. New York: Academic Press.
- Doulos, L., Tsangrassoulis, A., & Topalis, F. (2008). Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballast. *Energy and buildings* , 40, 36-50.
- Driankov, D., Ellenwood, H., & Rein frank, M. (1998). *An introduction to fuzzy control*. Springer.
- Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy* , 27 (3), 235-264.
- Erdogdu, E. (2009). On the wind in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 13 (6), 1361–1371.
- Esmaeili, A., & Abdollahzadeh, N. (2009). Oil explotation and the environmental Kuznets curve. *Energy Policy* , 37 (1), 371-374.
- Fernández de Torres, R., & Remacha Vallejo, M. (2004). Luz y salud: la respuesta inteligente mediante el alumbrado artificial.
- Fontoynt, M. (2002). Perceived performance of daylighting systems: lighting efficacy and agreableness. *Solar Energy* , 73 (2), 83-94.
- Galasiu, A. D., & Veitch, J. A. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review. *Energy and buildings* , 38, 728-742.
- Gottschalk, K., Nagy, L., & Farkas, I. (2003). Improved climate control for potato stores by fuzzy controllers. (40), 127-140.

- Gugliermetti, F., & Bisegna, F. (2006). Daylighting with external shading devices: design and simulation algorithms. *Building and environment* , 41, 135-149.
- Guishi, E., & Tinker, J. A. (2005). An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. *Building and environment* , 40, 51-61.
- Hinnells, M. (2008). Technologies to achieve demand reduction and microgeneration in buildings. *Energy Policy* , 36 (12), 4427-4433.
- Jantzen, J. (1998). Design of fuzzy controllers.
- Jasser, S. A., Hanifin, J. P., Rollag, M. D., & Brainard, G. C. (2006). Dim light adaptation attenuates acute melatonin suppression in humans. *Journal of biological rhythms* , 21, 394-404.
- Kamel, S., & Dahl, C. (2005). The economics of hybrid power systems for sustainable desert agriculture in Egypt. *Energy* , 30 (8), 1271–1281.
- Kelly, N. (2006). The role of energy efficiency in reducing Scottish and UK CO2 emissions. 34 (18), 3505-3515.
- Kolokotsa, D. (2003). Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment. *Building and environment* , 38, 1439-1450.
- Kolokotsa, D., Niachou, K., Geros, V., Kalaitzakis, K., Stavrakakis, G., & Santamouris, M. (2005). Implementation of an integrated indoor environment and energy management system. *Energy and buildings* , 37, 93-99.
- Kolokotsa, D., Saridakis, G., Pouliezos, A., & Stavrakakis, G. (2006). Design and installation of an advanced EIB fuzzy indoor comfort controller using Matlab. *Energy and buildings* , 38, 1084-1092.
- Kovacic, Z., & Bogdan, S. (2006). *Fuzzy Controller Design*. CRC Press.
- Krüger, E. L., & Zannin, P. H. (2004). Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. *Building and environment* , 39, 1055-1063.
- Lack, L., & Wright, H. (1993). The effect of evening bright light in delaying the circadian rhythms and lengthening the sleep of early morning awakening insomniacs. *Sleep* , 16 (5), 436-443.
- Langniesz, O., Diekmann, J., & Lehr, U. (2009). Advanced mechanisms for the promotion of renewable energy - Models for the future evolution of the German Renewable Energy Act. *Energy Policy* , 37 (4), 1289-1297.

- Lee, E., & Selkowitz. (2006). The New York Times Headquarters daylight mockup: Monitored performance of the daylight control system. *Energy and Buildings* (38), 914 - 929.
- Lee, E., & Tavi, A. (2007). Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs. *Building and environment* , 42, 2439-2449.
- Leslie, R. (2003). Capturing the daylight dividend in buildings: why and how? *Building and environment* , 38, 381-385.
- Lew, D. J. (2000). Alternatives to coal and candles: wind power in China. *Energy Policy* , 28 (4), 271-286.
- Lewy, A., Kern, H., Rosenthal, N., & Wher, T. (1982). Bright artificial light treatment of manic-depressive patient with seasonal mood cycle. *American Journal of Psychiatry* , 139 (11), 1496-1498.
- López Cuellar, M., Tellez-Giron, J., Díaz Araúzo, A., Escobar Briones, C., Díaz-Araúzo, H., & Solís Suárez, B. (2006). Estudio de la variabilidad circadiana de la presión arterial sistemática en alumnos sanos de la Facultad de Medicina de la UNAM. *Revista Mexicana de Cardiología* , 16 (2), 80-86.
- Luna-Rubio, R., Ríos-Moreno, G., Herrera-Ruiz, G., Trejo-Perea, M., & Vargas-Vazquez, D. (2009). Sistema de iluminación automático basado en lógica difusa para edificios inteligentes. 5to Congreso Internacional de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro , 5 (1), 571-581.
- Luna-Rubio, R., Ríos-Moreno, G., Trejo-Perea, M., & Rivas-Araiza, E. (2007). Lighting automatic control system for fluorescent lamp. 3er Congreso Internacional de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro , 3 (1), A242-A250.
- Mansy, K. (2004). A user-friendly procedure to visualize the hourly quantitative performance of daylighting systems. *Solar Energy* , 77 (4), 373-380.
- Midilli, A., Dincer, I., & Ay, M. (2006). Green energy strategies for sustainable development. *Energy policy* , 34, 3623–3633.
- Mills, E., & Orlando, E. (2002). Why we're here: The \$230-billion global lighting energy bill. Proceedings of the 5th International Conference on Energy-Efficient Lighting. Nice, Francia.
- Mills, P., Tomkins, S., & Schlangen, L. (2007). The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. *Journal of Circadian Rhythms* , 5 (1).

- Mitchell, C., Zhang, J., Sigsgaard, T., Jantunen, M., Liou, P., Samson, R., et al. (2007). Current State of the Science: Health Effects and Indoor Environmental Quality. *Environmental Health Perspectives* , 115 (6), 958-964.
- Morghen, I., Turola, M., Forini, E., Di Pasquale, P., Zanatta, P., & Matarazzo, T. (2009). Ill-lighting syndrome: prevalence in shift-work personnel in the anaesthesiology and intensive care department of three Italian hospitals. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* , 4 (1).
- Muller-Furstenberger, G., & Wagner, M. (2007). Exploring the environmental Kuznets hypothesis: theoretical and economical problems. *Ecological Economics* , 62 (3-4), 648-660.
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 12 (9), 2265 - 2300.
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 12 (9), 2265 - 2300.
- Oral, G., Yener, A., & Bayazit, N. (2004). Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Building and Environment* , 39 (3), 281-287.
- Osterhaus, W. K. (2005). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar energy* , 79, 140-158.
- Ouyang, J., Ge, J., & Hokao, K. (2009). Economic analysis of energy-saving renovation measures for urban existing residential buildings in China based on thermal simulation and site investigation. *Energy Policy* , 37 (1), 140–149.
- Passino, K., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*.
- Pfeiffer, A., Koschenz, M., & Wokaun, A. (2005). Energy and building technology for the 2000W society-Potential of residential buildings in Switzerland. *Energy and buildings* , 37 (11), 1158-1174.
- Plan Nacional de Desarrollo 2007– 2012, poder ejecutivo federal, apartado 2.11, Energía, electricidad e hidrocarburos, 2007 pp 130-133, ver <http://www.presidencia.gob.mx/>
- Ribarich, T., & Contenti, C. (2002). Analog and digital fluorescent lighting systems.
- Ríos-Moreno, G., Trejo-Perea, M., Castañeda-Miranda, R., Hernández-Guzmán, V., & Herrera-Ruiz, G. (2007). Modelling temperature in intelligent buildings by means of autoregressive models. *Automation in construction* , 16, 713-722.

- Škrjanc, I., Zupančič, B., Furlan, B., & Krainer, A. (2001). Theoretical and experimental fuzzy modeling of building thermal dynamic response. 36, 1023-1038.
- Stevens, R. G., Blask, D. E., Brainard, G. C., Hansen, J., Lockley, S. W., Provencio, I., et al. (2007). Meeting report: The role of environmental lighting and circadian disruption in cancer and other diseases. 115, 1357-1362.
- Syed Fadzil, S. F., & Sheau-Jiunn, S. (2004). Sunlight control and daylight distribution analysis: The KOMTAR case study. Building and Environment (39), 713 - 717.
- Tejo-Perea, M., Ríos-Moreno, G., Rivas, E., & Rauch, V. (2005). Savings and analysis of the consumption and quality of the energy. 253-261.
- Thanachareonkit, A., Scartetzzini, J.-L., & Andersen, M. (2005). Comparing daylighting assessment of building in scale models and test modules. 79 (2), 168–182.
- Tippett, J., Handley, J. F., & Ravetz, J. (2007). Meeting the challenges of sustainable development - A conceptual appraisal of a new methodology for participatory ecological planning. Progress in Planning , 67 (1), 9-98.
- Trobec Lah, M., Zupancic, B., Peternelj, J., & Krainer, A. (2006). Daylighting illuminance control with fuzzy logic. Solar energy , 80, 307-321.
- Tsangrassoulis, A., Bourdakis, V., Geros, V., & Santamouris, M. (2006). A genetic algorithm solution to the design of slat-type shading system. Renewable energy , 31, 2321-2328.
- UNE-EN12464. (2003). Iluminación de los lugares de trabajo parte 1: Lugares de trabajo interiores .
- UNE-EN60929. (2006). Balastros electrónicos alimentados en corriente alterna para lámparas tubulares.
- Ürge-Vorsatz, D., & Novikova, A. (2007). Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings. Energy Policy , 36 (2), 642-661.
- Vela, J. A., Barrientos, A., & Caballero, J. L. (2006). Se dispara con Fox electricidad cara. Reforma .
- Voorspools, K. (2004). Sustainability of the future; rethinking the fundamentals of energy research. Renewable and sustainable reviews , 8, 599–608.

- Wehr, T., Schwartz, P., Turner, E., Feldman-Naim, S., Drake, C., & Rosenthal, N. (1995). Bimodal patterns of human melatonin secretion consistent with two-oscillator model of regulation. *Neuroscience Letters* , 194 (1-2), 105-108.
- Wigginton, M., & Harris, J. (2002). *Intelligent Skin*. (Oxford, Ed.) UK: Architectural press.
- Wong, J., Li, H., & Lai, J. (2008). Evaluating the system intelligence of the intelligent buildings systems Part 1: Development of key intelligent indicators and conceptual analytical framework. *Automation in construction* , 17, 284-302.
- Wong, J., Li, H., & Wang, S. (2005). Intelligent building research: a review. *Automation in construction* , 14, 143-159.
- Wong, P., Shimoda, Y., Nonaka, M., Inoue, M., & Mizuno, M. (2008). Semi-transparent PV: Thermal performance, power generation, daylight modelling and energy saving potential in a residential application. *Renewable energy* (33), 1024-1036.
- Wu, J., & Zhang, Y. (2008). Olympic Games promote the reduction in emissions of greenhouse gases in Beijing. *Energy Policy* , 36 (9), 3422-3426.
- Yang, J., & Peng, H. (2001). Decision support to the application of intelligent building technologies. 22, 67-77.
- Yener, A. (1999). A method of obtaining visual comfort using fixed shading devices in rooms. 34, 285-291.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control* , 8 (3), 338-353.

A. Apéndice

A.1. Abreviaturas empleadas

Abreviatura	Significado
bps	Bits por segundo
CAI	Calidad del ambiente interior
CD	Cargo por demanda de energía eléctrica
CE	Cargo por energía eléctrica
CFE	Acrónimo de comisión federal de electricidad
CFP	Cargo por factor de potencia
CRC	Comprobación de redundancia cíclica, mecanismo de detección de errores en sistemas digitales
CRI	Índice de rendimiento de color (acrónimo en inglés de <i>color rendering index</i>)
ctrl	Controlador
DALI	Acrónimo en inglés de <i>digitally addressable lighting interface</i> .
DAP	Cargo por concepto de alumbrado público
E	Iluminancia
e.g.	Abreviatura del latín <i>exempli gratia</i> que significa "por ejemplo"
EC	Eficiencia de costos
EE	Eficiencia energética
EI	Edificio inteligente
et al.	Abreviatura de la expresión latina <i>et alii</i> , que significa "y otros"
ϕ	Flujo luminoso (cantidad de luz emitida por unidad de tiempo) medida en lumen (lm)
FC	Factor de utilización de la demanda expresado en porcentaje. Se obtiene al dividir el consumo de energía entre el resultado de multiplicar la demanda máxima medida por el número de horas facturadas por CFE
FI	Facultad de Ingeniería
FP	Factor de potencia
GEI	Gases de efecto invernadero
η	Eficacia luminosa expresada en lúmenes por watt (lm/W)
H	Horario (de invierno o verano)
HI	Horario de invierno
HV	Horario de verano
HVAC	Sistema de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (acrónimo en inglés de <i>heating, ventilating and air conditioning system</i>)
i.e.	Abreviatura del latín <i>id est</i> que significa "esto es"
IEC	Acrónimo de en inglés de <i>international electrotechnical commission</i>
in	Pulgada, unidad de medida antropométrica que equivale a 2.54 cm
L	Luminancia

LED	Diodo emisor de luz (acrónimo en inglés de <i>light-emitting diode</i>)
LFC	Luz y fuerza del centro
lm	Lumen, unidad del sistema internacional de medidas utilizada para cuantificar el flujo luminoso
lx	Lux, es la unidad derivada del sistema internacional de medidas utilizada para cuantificar la iluminancia o nivel de iluminación
M	Emitancia luminosa
μ	Función de membrecía o de pertenencia
MBDPE	Millones de barriles por día de petróleo equivalente
MCU	Microcontrolador
MCU_MST	Microcontrolador maestro
MCU_SLV	Microcontrolador esclavo
MN	Moneda nacional
N/A	No aplica
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Potencia eléctrica expresa en watts (W)
PC	Computadora personal
PIE	Productores independientes de energía
PND	Plan de desarrollo nacional
R	Reflectancia
SAI	Sistema de ascensor inteligente
SCMG	Sistema computarizado para el mantenimiento y gestión
SCVAA	Sistema de calentamiento, ventilación y aire acondicionado
SDCI	Sistema direccionable para el control de iluminación
SDDFA	Sistema direccionable para la detección de fuego y alarmas
SEN	Sistema eléctrico nacional
SI	Sistema internacional de unidades
SIE	Sistema de información energética
SIGE	Sistema integral de gestión del edificio
sii	Abreviatura empleada en matemáticas y lógica para expresar la condicional doble "si y sólo si"
SIT	Sistema de información y telecomunicaciones
SMSCA	Sistema de monitoreo de seguridad y control de acceso
THD	Distorsión total armónica (acrónimo en inglés de <i>total distortion harmonic</i>)
toe	Tonelada de petróleo equivalente
UAQ	Universidad Autónoma de Querétaro
UNE-EN	Es la versión en español oficial de las normas europeas
USB	Bus serial universal
$V(\lambda)$	Curva espectral de la eficiencia luminosa para la visión fotópica
VCA	Voltios de corriente alterna
W	Vatio o watt, es la unidad de potencia del sistema internacional de unidades.

En teoría de conjuntos, es la notación empleada para expresar
 € "pertenece a"

A.2. Niveles de iluminación para edificios educativos recomendados por la norma UNE-EN 12464

donde:

$\bar{E}_m$ es la iluminancia mantenida,

UGR_L Índice de Deslumbramiento Unificado y

R_a el rendimiento de colores mínimos.

Cuadro A.1. Niveles de iluminación interiores recomendados para edificios educativos.

Tipo de interior, tarea y actividad	$\bar{E}_m$ lux	UGRL -	Ra -	Observaciones
Aulas, aulas de tutoría	300	19	80	La iluminación debería ser controlable
Aulas para clases nocturnas y educación de adultos	500	19	80	La iluminación debería ser controlable
Sala de lectura	500	19	80	La iluminación debería ser controlable
Pizarra	500	19	80	Evitar reflexiones especulares
Mesa de demostraciones	500	19	80	En salas de lectura 750 lux
Aulas de arte	500	19	80	
Aulas de arte en escuelas de arte	750	19	90	Tcp≥5000 K
Aulas de dibujo técnico	750	16	80	
Aulas de prácticas y laboratorios	500	19	80	
Aulas de manualidades	500	19	80	
Talleres de enseñanza	500	19	80	
Aulas de prácticas de música	300	19	80	
Aulas de prácticas de informática	300	19	80	Trabajo con EVP: véase anexo 6
Laboratorio de lenguas	300	19	80	
Aulas de preparación y talleres	500	22	80	
Halls de entrada	200	22	80	

Áreas de circulación, pasillos	100	25	80	
Escaleras	150	25	80	
Aulas comunes de estudio y aulas de reunión	200	22	80	
Salas de profesores	300	19	80	
Biblioteca: estanterías	200	19	80	
Biblioteca: salas de lectura	500	19	80	
Almacenes de material de profesores	100	25	80	
Salas de deportes, gimnasios, piscinas (uso general)	300	22	80	Para actividades más específicas, se debe usar los requisitos de la Norma EN 12193
Cantinas escolares	200	22	80	
Cocina	500	22	80	

* EVP Equipo con pantalla de visualización

A.2. Especificaciones del luxómetro empleado

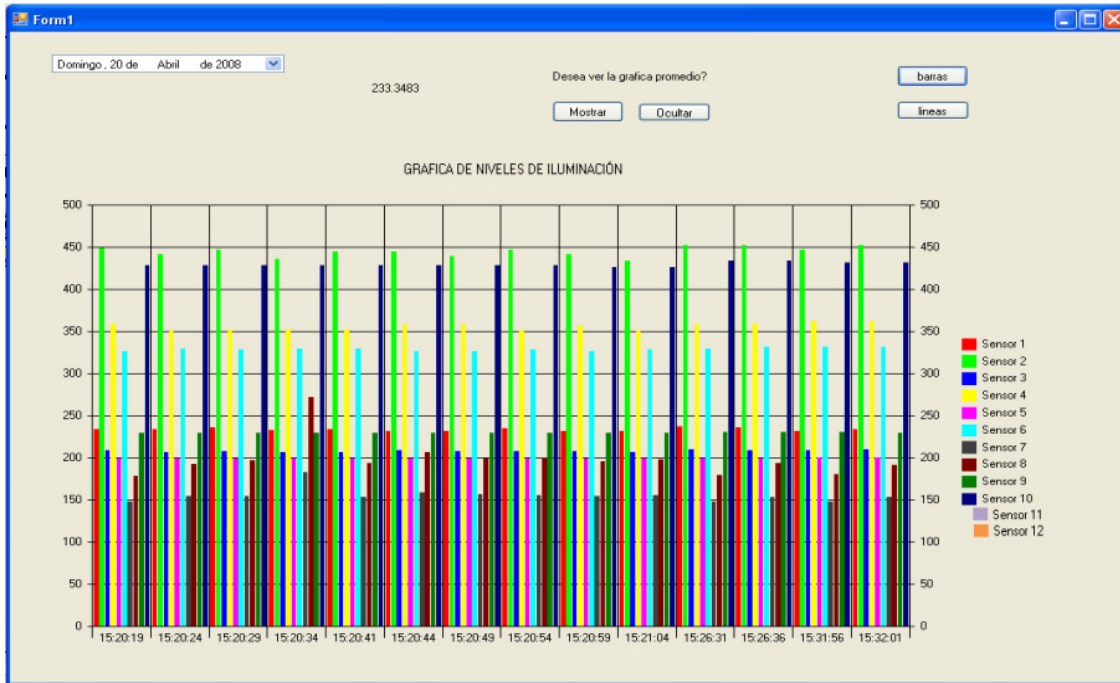
Cuadro A.2. Especificaciones del luxómetro portátil HI 97500.

Especificaciones	HI 97500
Intervalo	0.001 a 1.999 Klux 0.01 a 19.99 Klux 0.1 a 199.9 Klux
Resolución	0.001 Klux 0.01 Klux 0.1 klux
Exactitud	lectura de $\pm 6\%$; ± 2 dígitos
Sensor	Foto-diodo de respuesta de tipo "ojo humano", con cable coaxial de 1.5 m (fijo)
Batería / Duración	Alcalina de 9v / 200 hrs. de uso continua prox. Auto desconexión después de 7 min. de inactividad.
Condiciones de Trabajo	0 a 50° C; HR 100%
Dimensiones	164 x 76 x 45 mm
Peso	510 grs

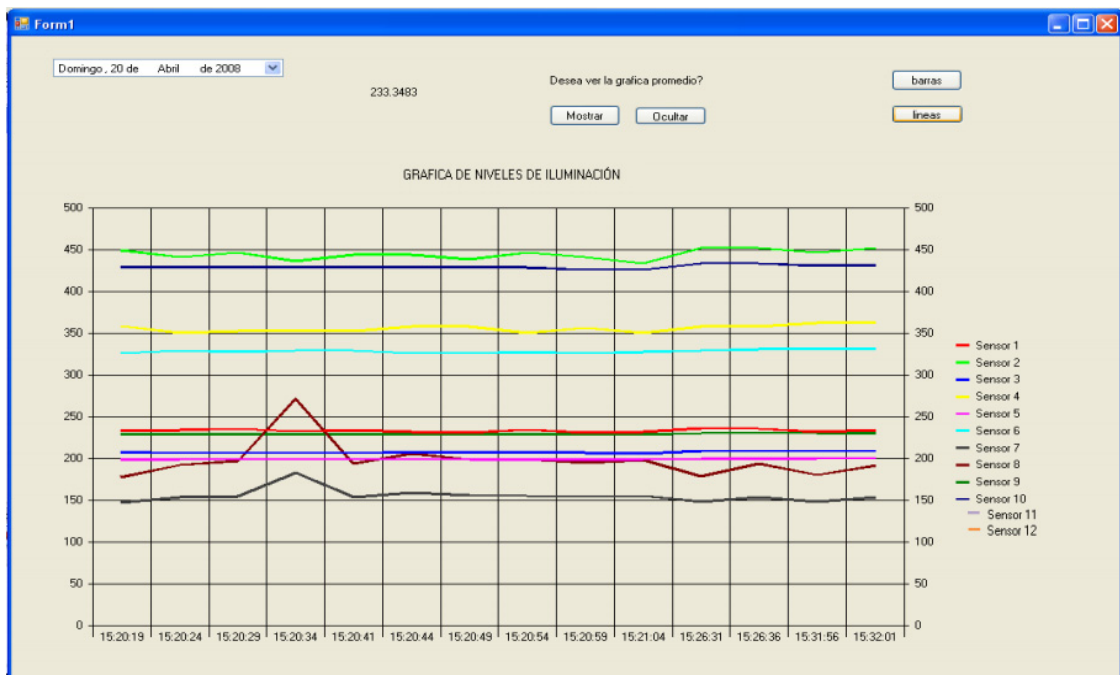
A.3. Reglas de inferencias para el controlador difuso propuesto

- 1 .- $E_{int} = Bajo \wedge E_{ext} = Bajo \rightarrow Lamp = Alto$
- 2 .- $E_{int} = Bajo \wedge E_{ext} = Medio bajo \rightarrow Lamp = Alto$
- 3 .- $E_{int} = Bajo \wedge E_{ext} = Medio \rightarrow Lamp = Medio$
- 4 .- $E_{int} = Bajo \wedge E_{ext} = Medio alto \rightarrow Lamp = Medio bajo$
- 5 .- $E_{int} = Medio bajo \wedge E_{ext} = Bajo \rightarrow Lamp = Alto$
- 6 .- $E_{int} = Medio bajo \wedge E_{ext} = Medio bajo \rightarrow Lamp = Medio alto$
- 7 .- $E_{int} = Medio bajo \wedge E_{ext} = Medio \rightarrow Lamp = Bajo$
- 8 .- $E_{int} = Medio bajo \wedge E_{ext} = Medio alto \rightarrow Lamp = Bajo$
- 9 .- $E_{int} = Medio bajo \wedge E_{ext} = Alto \rightarrow Lamp = Bajo$
- 10.- $E_{int} = Medio \wedge E_{ext} = Bajo \rightarrow Lamp = Alto$
- 11.- $E_{int} = Medio \wedge E_{ext} = Medio bajo \rightarrow Lamp = Medio bajo$
- 12.- $E_{int} = Medio \wedge E_{ext} = Medio \rightarrow Lamp = Bajo$
- 13.- $E_{int} = Medio \wedge E_{ext} = Alto \rightarrow Lamp = Medio bajo$
- 14.- $E_{int} = Medio alto \wedge E_{ext} = Bajo \rightarrow Lamp = Alto$
- 15.- $E_{int} = Medio alto \wedge E_{ext} = Medio bajo \rightarrow Lamp = Medio bajo$
- 16.- $E_{int} = Medio alto \wedge E_{ext} = Medio \rightarrow Lamp = Medio bajo$
- 17.- $E_{int} = Medio alto \wedge E_{ext} = Medio alto \rightarrow Lamp = Medio$
- 18.- $E_{int} = Medio alto \wedge E_{ext} = Alto \rightarrow Lamp = Bajo$
- 19.- $E_{int} = Alto \wedge E_{ext} = Bajo \rightarrow Lamp = Alto$
- 20.- $E_{int} = Alto \wedge E_{ext} = Medio bajo \rightarrow Lamp = Bajo$
- 21.- $E_{int} = Alto \wedge E_{ext} = Medio \rightarrow Lamp = Bajo$
- 22.- $E_{int} = Alto \wedge E_{ext} = Alto \rightarrow Lamp = Bajo$

A.4. Capturas de pantalla de la interfaz del sistema de monitoreo de variables lumínicas



a)



b)

Figura A.1. Capturas de pantalla de la interfaz del sistema de monitoreo de variables lumínicas. a) Niveles de iluminación visualizados mediante gráficas de barras. b) Niveles de iluminación visualizados mediante graficas de líneas.

A.5. Listado del microcontrolador PIC con la implementación del controlador difuso propuesto

```
#include <18F4550.h>
#device ADC = 10
#include <math.h>

#fuses XTPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL1,CPUDIV1,VREGEN
#use delay(clock = 48000000)
#use rs232(rcv = PIN_C7, xmit = PIN_C6, baud =115200, bits = 8, parity = 0, stop
= 1 , BRGH1OK)

typedef struct Difuso
{
    //-----
    // Conjunto triangular | Conjunto Trapezoidal
    //-----
    float a; // Límite inferior | Limite inferior
    float b; // Punta | Punta inferior
    float c; // Límite superior | Punta superior
    float d; // No aplica | Límite superior
    //-----

    float mu; // Grado de membrecía (valor normalizado)
    float Cen; // Centro del conjunto difuso
    int1 Tipo; // Especifica si el conjunto es triangular (Triang = 0, Trap = 1)
    int1 CDOk; // Conjunto Difuso Ok, determina si el conjunto esta correctamente
    definido

}fusi_ConjDif;

////////////////////////////////////
// Etiquetas y variables
////////////////////////////////////
#define CH0 0

////////////////////////////////////
// Definición de conjuntos difusos
////////////////////////////////////

#define Triangular 0
#define Trapezoidal 1

#define In1Ba_A -17.9
#define In1Ba_B -0.992
#define In1Ba_C 10.1
#define In1Ba_D 41.07
#define In1Ba_T Trapezoidal
#define In1MB_A 9.603
#define In1MB_B 39.6
#define In1MB_C 77.6
#define In1MB_D 0.0
#define In1MB_T Triangular
#define In1Me_A 41.9
#define In1Me_B 80.0
#define In1Me_C 121.0
```

```

#define In1Me_D 0.0
#define In1Me_T Triangular
#define In1MA_A 79.17
#define In1MA_B 120.0
#define In1MA_C 150.0
#define In1MA_D 0.0
#define In1MA_T Triangular
#define In1Al_A 120.0
#define In1Al_B 150.0
#define In1Al_C 500.0
#define In1Al_D 530.0
#define In1Al_T Trapezoidal
#define In2Ba_A 9000.0
#define In2Ba_B 1000.0
#define In2Ba_C 4010.0
#define In2Ba_D 11380.0
#define In2Ba_T Trapezoidal
#define In2MB_A 4227.0
#define In2MB_B 12500.0
#define In2MB_C 22500.0
#define In2MB_D 0.0
#define In2MB_T Triangular
#define In2Me_A 15000.0
#define In2Me_B 25000.0
#define In2Me_C 35000.0
#define In2Me_D 0.0
#define In2Me_T Triangular
#define In2MA_A 27500.0
#define In2MA_B 37500.0
#define In2MA_C 47500.0
#define In2MA_D 0.0
#define In2MA_T Triangular
#define In2Al_A 37500.0
#define In2Al_B 50000.0
#define In2Al_C 150000.0
#define In2Al_D 160000.0
#define In2Al_T Trapezoidal

// Salida del controlador normalizada
#define OutBa_A -1.753
#define OutBa_B -1.553
#define OutBa_C 0.05297
#define OutBa_D 0.1468
#define OutBa_T Trapezoidal
#define OutMB_A 0.05274
#define OutMB_B 0.2527
#define OutMB_C 0.4527
#define OutMB_D 0.0
#define OutMB_T Triangular
#define OutMe_A 0.342
#define OutMe_B 0.542
#define OutMe_C 0.742
#define OutMe_D 0.0
#define OutMe_T Triangular
#define OutMA_A 0.605
#define OutMA_B 0.805
#define OutMA_C 0.101
#define OutMA_D 0.0
#define OutMA_T Triangular
#define OutAl_A 0.858
#define OutAl_B 1.06
#define OutAl_C 1.56
#define OutAl_D 1.76

```

```

#define OutAl_T Trapezoidal

#define ResADC 1023.0

int16 Temp=0; // Contador para llevar una base de tiempo

#define MaxTemp 1000 // Valor máximo que alcanza el contador Temp
int1 EdoTemp=0; // Estado del Temporizador, sirve para determinar
// si ya ha pasado el tiempo esperado

float RExt = 55000.00; // Valor de la resistencia en el sensor externo (ohms)
float REint = 70000.00; // Valor de la resistencia en el sensor interno (ohms)

/////////////////////////////////////////////////////////////////

/////////////////////////////////////////////////////////////////
#INT_TIMER0
ISR(void)
{
    output_toggle(PIN_B1);
    set_timer0(68);
    Temp++;
    if(Temp >= MaxTemp)
    { EdoTemp = 1;
      Temp =0;
    }
}

}

//*****
// DACaLx: DAC a luxes.
//
// Descripción:
// Dado un valor de resistencia (ohms) y una lectura del ADC, calcula
// la corriente que pasa por el resistor y estima el nivel de
// iluminación en luxes registrada por el sensor SH5711.
// Parametros de entrada:
// Lectura del ADC,
//*****
float DACaLx(int16 ADC, float Rl)
{
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
    //
    //  $Ev = (Eo) * (10^{(Vout/(Rl*S))})$ 
    // Donde:
    // Ev -> Iluminación medida (lx)
    // Eo -> 1 lx
    // Vout-> Voltaje medido en la resistencia de carga (voltios)
    // Rl -> Resistencia de carga a la salida del sensor (ohms)
    // S -> 10 uA
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////

    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
    // Declaración de variables
    //-----
    float Ev; // Iluminación medida (lx)
    float Vout; // Voltaje medido en la resistencia de carga (voltios)
    float k; // Constante  $k = Rl*S$ 
    ///////////////////////////////////////////////////////////////////
    Vout = ((float)ADC)/ResADC*5.0;

```

```

        k = 0.00001*R1;
        k = Vout/k;
        //return k;
        Ev = pow(10.0, k);
    // return Vout;
    return Ev;
}
//*****

//*****
//    CCD(ConjDif A): Centro de Conjunto Difuso
//
//
//    Descripción:
//    Calcula el centro del conjunto difuso dado
//
//
//
//*****
float fusi_CCD(fusi_ConjDif A)
{ float X= -1.0;

    if(A.Tipo == Triangular)
    { X = A.b;
    }
    if(A.Tipo == Trapezoidal)
    { X = (A.d - A.a + A.c - A.b) / 2.0;
    }
    return X;
}
//*****

//*****
//    inicConjDif: inicializa un conjunto difuso
//
//
//    Descripción:
//
//    Dado un conjunto difuso, regresa el centro del mismo
//
//
//*****

fusi_ConjDif fusi_InicConjDif(float a, float b, float c, float d, int1 Tipo )
{
    fusi_ConjDif X;
    X.a = 0.0;
    X.b = 0.0;
    X.c = 0.0;
    X.d = 0.0;
    X.mu = 0.0;
    X.CDok = 0;

    if(a<b && b<c)
    { if(Tipo == Triangular)
        {
            X.a = a;
            X.b = b;
            X.c = c;
            X.CDok = 1;
            X.Tipo = Tipo;
            X.Cen = fusi_CCD(X);
        }
        else

```

```

        { if(c<d)
        {
            X.a = a;
            X.b = b;
            X.c = c;
            X.d = d;
            X.CDOk = 1;
            X.Tipo = Tipo;
            X.Cen = fusi_CCD(X);
        }
    }
}
return(X);

}
//*****

//*****
//    mu_x:Calcula el grado de pertenencia de un valor X en un conjunto
//    difuso A
//
//    Descripción:
//
//
//
//
//*****
fusi_ConjDif fusi_Mu_x(fusi_ConjDif A, float X)
{
    //X = 0.0;
    A.mu = 0.0;

    if(A.Tipo == Triangular)
    {
        if( X == A.b )
            A.mu = 1.0;
        else if( X > A.a && X < A.b )
            A.mu = 1.0 - ( fabs(A.b - X)/(A.b - A.a) );
        else if( X > A.b && X < A.c )
            A.mu = 1.0 - ( fabs(A.b - X)/(A.c - A.b) );
    }
    else
    { printf("X = %.2f  B = %.2f  C = %.2f \r\n", X, A.b, A.c);
      if( X>A.b && X<A.c )
          A.mu = 1.0;
      else if( X>A.a && X<A.b )
          A.mu = 1.0 - ( fabs(A.b - X)/(A.b - A.a) );
      else if(X>A.c && X<A.d)
          A.mu = 1.0 - ( fabs(X - A.c)/(A.d - A.c) );
    }
    return A;
}

//*****

//*****
//    Min: Recibe dos flotantes y devuelve el menor de ellos
//
//    Descripción:
//
//
//*****

```

```

float fusi_Min(float X, float Y)
{
    float min;
    if(X < Y)
        min = X;
    else
        min = Y;
    return min;
}

//*****
//*****
//    Inf: Realiza una inferencia lógica, recibe des grados de
//          membresía correspondientes a las entradas devolviendo
//          el valor mínimo de los datos entrantes solo si ambos
//          son distintos de cero
//
// Descripción:
//
//*****
float fusi_Inf(float MU_1, float MU_2)
{
    float Sal=0.0;

    if( ( MU_1 != 0.0 ) && (MU_2 != 0.0) )
        Sal = fusi_Min( MU_1, MU_2 );
    return Sal;
}

void main(void)
{
    //////////////////////////////////////
    // Declaración de variables
    //////////////////////////////////////

    fusi_ConjDif In1Ba; // Entrada 1 Baja
    fusi_ConjDif In1MB; // Entrada 1 Media Baja
    fusi_ConjDif In1Me; // Entrada 1 Media
    fusi_ConjDif In1MA; // Entrada 1 Media Alta
    fusi_ConjDif In1Al; // Entrada 1 Alta

    fusi_ConjDif In2Ba; // Entrada 2 Baja
    fusi_ConjDif In2MB; // Entrada 2 Media Baja
    fusi_ConjDif In2Me; // Entrada 2 Media
    fusi_ConjDif In2MA; // Entrada 2 Media Alta
    fusi_ConjDif In2Al; // Entrada 2 Alta

    fusi_ConjDif OutBa; // Salida Baja
    fusi_ConjDif OutMB; // Salida Media Baja
    fusi_ConjDif OutMe; // Salida Media
    fusi_ConjDif OutMA; // Salida Media Alta
    fusi_ConjDif OutAl; // Salida Alta

    int16 intEint; // Iluminación interna salida del ADC
    int16 intEext; // Iluminación externa salida del ADC
    float floatEint; // Iluminación interna (lx)
    float floatEext; // Iluminación externa (lx)

    float SalDef; // Salida defusificada
    float NumSal; // Numerador de la salida defusificada
    float DenSal; // Denominador de la salida defusificada
    int16 SalPWM; // Salida a PWM

```

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// Configuración de hardware
/////////////////////////////////////////////////////////////////
// Configurar el ADC
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_4);
setup_adc_ports(AN0_TO_AN3);

// Interrupciones
enable_interrupts(GLOBAL);
enable_interrupts(INT_TIMER0);
// (48000000/4)/256
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_64|RTCC_8_BIT);
//disable_interrupts(GLOBAL);

setup_ccp1(CCP_PWM); // Configura CCP1 como PWM

setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 35, 1);
set_tris_c(0x00);
/////////////////////////////////////////////////////////////////

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// ESTABLECIMIENTO DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS DE ENTRADA Y SALIDA
//
// Establecimiento de los conjuntos difusos para la entrada 1
In1Ba = fusi_InicConjDif(In1Ba_A, In1Ba_B, In1Ba_C, In1Ba_D, In1Ba_T);
In1MB = fusi_InicConjDif(In1MB_A, In1MB_B, In1MB_C, In1MB_D, In1MB_T);
In1Me = fusi_InicConjDif(In1Me_A, In1Me_B, In1Me_C, In1Me_D, In1Me_T);
In1MA = fusi_InicConjDif(In1MA_A, In1MA_B, In1MA_C, In1MA_D, In1MA_T);
In1Al = fusi_InicConjDif(In1Al_A, In1Al_B, In1Al_C, In1Al_D, In1Al_T);

// Establecimiento de los conjuntos difusos para la entrada 2
In2Ba = fusi_InicConjDif(In2Ba_A, In2Ba_B, In2Ba_C, In2Ba_D, In2Ba_T);
In2MB = fusi_InicConjDif(In2MB_A, In2MB_B, In2MB_C, In2MB_D, In2MB_T);
In2Me = fusi_InicConjDif(In2Me_A, In2Me_B, In2Me_C, In2Me_D, In2Me_T);
In2MA = fusi_InicConjDif(In2MA_A, In2MA_B, In2MA_C, In2MA_D, In2MA_T);
In2Al = fusi_InicConjDif(In2Al_A, In2Al_B, In2Al_C, In2Al_D, In2Al_T);

// Establecimiento de los conjuntos difusos para la salida del controlador
OutBa = fusi_InicConjDif(OutBa_A, OutBa_B, OutBa_C, OutBa_D, OutBa_T);
OutMB = fusi_InicConjDif(OutMB_A, OutMB_B, OutMB_C, OutMB_D, OutMB_T);
OutMe = fusi_InicConjDif(OutMe_A, OutMe_B, OutMe_C, OutMe_D, OutMe_T);
OutMA = fusi_InicConjDif(OutMA_A, OutMA_B, OutMA_C, OutMA_D, OutMA_T);
OutAl = fusi_InicConjDif(OutAl_A, OutAl_B, OutAl_C, OutAl_D, OutAl_T);
/////////////////////////////////////////////////////////////////

while (TRUE)
{
    output_toggle(PIN_B7);
    delay_ms(1000);
    set_adc_channel(0);
    delay_us(20);
    intEint = read_adc();
    set_adc_channel(2);
    delay_us(20);
    intEext = read_adc();

    floatEint = (( (float)intEint)/ResADC )*5.0/(REint/1000000.0);
    floatEext = (( (float)intEext)/ResADC )*5.0/(REext/1000000.0);
    //printf("Eint(uA) = %.6f Eext(uA) = %.6f ",floatEint,floatEext);
}

```

```

floatEint = DACaLx(intEint, REint);
floatEext = DACaLx(intEext, REext);
printf("Eint(lx) = %.2f  Eext(lx) = %.2f\r\n",floatEint,floatEext);

// Saturacion de la Eint
if(floatEint < In1Ba_B)
    floatEint = In1Ba_B;
if(floatEint > In1Al_B)
    floatEint = In1Al_B;

// Saturacion de la Eext
if(floatEext < In2Ba_B)
    floatEext = In2Ba_B;
if(floatEext > In2Al_B)
    floatEext = In2Al_B;
printf("Eint(lx) = %.2f  Eext(lx) = %.2f\r\n",floatEint,floatEext);

In1Ba = fusi_Mu_x(In1Ba, floatEint);
In1MB = fusi_Mu_x(In1MB, floatEint);
In1Me = fusi_Mu_x(In1Me, floatEint);
In1MA = fusi_Mu_x(In1MA, floatEint);
In1Al = fusi_Mu_x(In1Al, floatEint);
//printf("EintBA(mu) = %.2f EintBA.A = %.2f EintBA.B = %.2f EintBA.C =
%.2f EintBA.D %.2f EintBA.T = %i \n",In1Ba.mu, In1Ba.a, In1Ba.b, In1Ba.c,
In1Ba.d, In1Ba.Tipo);
printf("EintBA = %.3f EintMB = %.3f EintMe = %.3f EintMA = %.3f EintMA
%.3f\r\n",In1Ba.mu, In1MB.mu, In1Me.mu, In1MA.mu, In1Al.mu);

In2Ba = fusi_Mu_x(In2Ba, floatEext);
In2MB = fusi_Mu_x(In2MB, floatEext);
In2Me = fusi_Mu_x(In2Me, floatEext);
In2MA = fusi_Mu_x(In2MA, floatEext);
In2Al = fusi_Mu_x(In2Al, floatEext);

printf("EextBA = %.3f EextMB = %.3f EextMe = %.3f EextMA = %.3f EextMA
%.3f \r\n",In2Ba.mu, In2MB.mu, In2Me.mu, In2MA.mu, In2Al.mu);

////////////////////////////////////////
// Máquina de inferencias y defusificación
////////////////////////////////////////

NumSal = 0.0;// Inicialización del numerador de la salida defusificada
DenSal = 0.0;// Inicialización del denominador de la salida defusificada

// Regla 1.- EintBA && EextBA -> Lamp es alto
NumSal += ( fusi_Inf( In1Ba.mu, In2Ba.mu ) ) * OutAl.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Ba.mu, In2Ba.mu);

// Regla 2.- EintBa && EextMB-> Lamp es alto
NumSal += ( fusi_Inf( In1Ba.mu, In2MB.mu ) ) * OutAl.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Ba.mu, In2MB.mu);

// Regla 3.- EintBa && EextMe-> Lamp es medio
NumSal += ( fusi_Inf( In1Ba.mu, In2Me.mu ) ) * OutMe.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Ba.mu, In2Me.mu);

// Regla 4.- EintBa && EextMA-> Lamp es medio bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1Ba.mu, In2MA.mu ) ) * OutMB.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Ba.mu, In2MA.mu);

// Regla 5.- EintMB && EextBajo -> Lamp es alto

```

```

NumSal += ( fusi_Inf( In1MB.mu, In2Ba.mu ) ) * OutAl.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MB.mu, In2Ba.mu);

// Regla 6.- EintMB && EextMB-> Lamp es medio alto
NumSal += ( fusi_Inf( In1MB.mu, In2MB.mu ) ) * OutMA.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MB.mu, In2MB.mu);

// Regla 7.- EintMB && EextMe-> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1MB.mu, In2Me.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MB.mu, In2Me.mu);

// Regla 8.- EintMB && EextMA-> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1MB.mu, In2MA.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MB.mu, In2MA.mu);

// Regla 9.- EintMB && EextAl-> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1MB.mu, In2Al.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MB.mu, In2Al.mu);

// Regla 10.- EintMe && EextBa -> Lamp es alto
NumSal += ( fusi_Inf( In1Me.mu, In2Ba.mu ) ) * OutAl.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Me.mu, In2Ba.mu);

// Regla 11.- EintMe && EextMB -> Lamp es medio bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1Me.mu, In2MB.mu ) ) * OutMB.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Me.mu, In2MB.mu);

// Regla 12.- EintMe && EextMe -> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1Me.mu, In2Me.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Me.mu, In2Me.mu);

// Regla 13.- EintMe && EextAl -> Lamp es medio bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1Me.mu, In2Al.mu ) ) * OutMB.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Me.mu, In2Al.mu);

// Regla 14.- EintMA && EextBa -> Lamp es alto
NumSal += ( fusi_Inf( In1MA.mu, In2Ba.mu ) ) * OutAl.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MA.mu, In2Ba.mu);

// Regla 15.- EintMA && EextMB -> Lamp es medio bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1MA.mu, In2MB.mu ) ) * OutMB.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MA.mu, In2MB.mu);

// Regla 16.- EintMA && EextMe -> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1MA.mu, In2Me.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MA.mu, In2Me.mu);

// Regla 17.- EintMA && EextMA -> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1MA.mu, In2MA.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MA.mu, In2MA.mu);

// Regla 18.- EintMA && EextAl -> Lamp es medio bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1MA.mu, In2Al.mu ) ) * OutMB.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1MA.mu, In2Al.mu);

// Regla 19.- EintAl && EextBa -> Lamp es alto
NumSal += ( fusi_Inf( In1Al.mu, In2Ba.mu ) ) * OutAl.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Al.mu, In2Ba.mu);

// Regla 20.- EintAl && EextMB -> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1Al.mu, In2MB.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Al.mu, In2MB.mu);

```

```

// Regla 21.- EintAl && EextMe -> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1Al.mu, In2Me.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Al.mu, In2Me.mu);

// Regla 22.- EintAl && EextAl -> Lamp es bajo
NumSal += ( fusi_Inf( In1Al.mu, In2Al.mu ) ) * OutBa.Cen;
DenSal += fusi_Inf( In1Al.mu, In2Al.mu);

SalDef = NumSal/DenSal;
SalPWM = (int16)(SalDef*1023.0);

printf("SalFus (0 a 1) = %.3f SalPWM = %Lu\r\n\r\n", SalDef, SalPWM);
};
}

```

A.6 Listado en Matlab para realizar la simulación del sistema de iluminación regulable basado en lógica difusa

```

dato=load('DatosS21BuenoSim.txt');
%Cargo datos de los sensores

P1=dato(:,2);
P2=dato(:,3);
P3=dato(:,4);
P4=dato(:,5);
P5=dato(:,6);
P6=dato(:,7);
P7=dato(:,8);
P8=dato(:,9);
P9=dato(:,10);
P10=dato(:,11);
P11=dato(:,12);
P12=dato(:,13);
P13=dato(:,14);
IPM=dato(:,15);
Eext = dato(:,16);

% Algoritmo
% 1.- Con la primera medición, calcular una señal de control
% 2.- Con la señal de control, hacer un estimado de la iluminación
% 3.- Con el nuevo valor de iluminación y con la luz de las lámparas,
% calcular un nuevo error
% 4.- Con el nuevo error, calcular los nuevos valores de iluminación
% 5.- Regresar al paso 3

SP = 0.12;
Out(1) = 0;
Out(2) = 0;

i=1;
P1S(i) = P1(i);
P2S(i) = P2(i);
P3S(i) = P3(i);
P4S(i) = P4(i);
P5S(i) = P5(i);
P6S(i) = P6(i);
P7S(i) = P7(i);
P8S(i) = P8(i);
P9S(i) = P9(i);
P10S(i) = P10(i);

```

```

P11S(i) = P11(i);
P12S(i) = P12(i);
P13S(i) = P13(i);
IPS(i) = ( P1S(i) + P2S(i) + P3S(i) + P4S(i) + P5S(i) + P6S(i) + P7S(i) + P8S(i)
+ P9S(i) + P10S(i) + P11S(i) + P12S(i) )/ 12;

i=2;
P1S(i) = P1(i);
P2S(i) = P2(i);
P3S(i) = P3(i);
P4S(i) = P4(i);
P5S(i) = P5(i);
P6S(i) = P6(i);
P7S(i) = P7(i);
P8S(i) = P8(i);
P9S(i) = P9(i);
P10S(i) = P10(i);
P11S(i) = P11(i);
P12S(i) = P12(i);
P13S(i) = P13(i);

Out(i) = evalfis( [P13S(i) Eext(i)] , SimCtrl4 );
IPS(i) = ( P1S(i) + P2S(i) + P3S(i) + P4S(i) + P5S(i) + P6S(i) + P7S(i) + P8S(i)
+ P9S(i) + P10S(i) + P11S(i) + P12S(i) )/ 12;

for i=3:50
    if( Out(i-1)>0.1 ) % Lamparas encendidas
        P13S(i) = ( P13(1)*Out(i-1) ) + P13(i);
    else % Lamparas apagadas
        P13S(i) = P13(i);
    end
    % Out = Salida del controlador expresada en volts x10
    Temp1 = P13S(i);
    Temp2 = Eext(i);
    % if( P13S(i-1)>0.15 )
    % Temp1=0.15;
    % end

    % if( Eext(i-1)>50 )
    % Temp2 = 50;
    % end
    Out(i) = evalfis( [Temp1 Temp2] , SimCtrl4 );

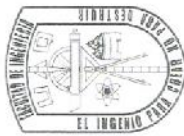
    if(Out(i-1)<0.1)
        Out(i-1) = 0;
    end
    P1S(i) = ( P1(1)*Out(i-1) ) + P1(i);
    P2S(i) = ( P2(1)*Out(i-1) ) + P2(i);
    P3S(i) = ( P3(1)*Out(i-1) ) + P3(i);
    P4S(i) = ( P4(1)*Out(i-1) ) + P4(i);
    P5S(i) = ( P5(1)*Out(i-1) ) + P5(i);
    P6S(i) = ( P6(1)*Out(i-1) ) + P6(i);
    P7S(i) = ( P7(1)*Out(i-1) ) + P7(i);
    P8S(i) = ( P8(1)*Out(i-1) ) + P8(i);
    P9S(i) = ( P9(1)*Out(i-1) ) + P9(i);
    P10S(i) = ( P10(1)*Out(i-1) ) + P10(i);
    P11S(i) = ( P11(1)*Out(i-1) ) + P11(i);
    P12S(i) = ( P12(1)*Out(i-1) ) + P12(i);
    P13S(i) = ( P13(1)*Out(i-1) ) + P13(i);
    % IPS = Iluminación Promedio Simulada
    IPS(i) = ( P1S(i) + P2S(i) + P3S(i) + P4S(i) + P5S(i) + P6S(i) + P7S(i) +
P8S(i) + P9S(i) + P10S(i) + P11S(i) + P12S(i) )/ 12;
end

```


ANEXOS

Anexo 1. Reconocimientos obtenidos.

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE QUERÉTARO



20 al 24 de Abril 2009

5º CONGRESO
INTERNACIONAL DE INGENIERÍA

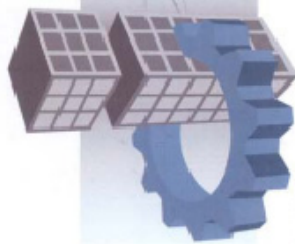
La UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO a través de
la FACULTAD DE INGENIERÍA, otorga el presente reconocimiento a:

Ricardo Luna Rubio

por haber participado en el Congreso Internacional de Ingeniería en su quinta edición
con la ponencia: **Sistema de iluminación automático basado en
lógica difusa para edificios inteligentes**; realizado en la ciudad de
Santiago de Querétaro, México.

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director
Facultad de Ingeniería

M.L. Adriana Medellín
Comité Organizador



**4º CONGRESO
INTERNACIONAL DE INGENIERÍA**



23 al 25 de abril del 2008

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

R. LUNA, G.J. RÍOS, G. HERRERA, R. CASTAÑEDA, M. TREJO

por haber obtenido el 3 lugar en el 4º Congreso Internacional de Ingeniería
con el póster

“Análisis del confort lumínico en salones de clase”



Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director
Facultad de Ingeniería



Dr. Rufino Nava Mendoza
Coordinador de la sesión de pósters



CONGRESO INTERNACIONAL
DE INGENIERIA



La UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
a través de la FACULTAD DE INGENIERÍA otorga
el presente reconocimiento a
RICARDO LUNA RUBIO

por haber participado como
Ponente con el artículo

**Sistema de control automático de iluminación para
lámparas fluorescentes.**

en el 3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA.

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director
Facultad de Ingeniería

Dra. Rocío Peniche Vera
Organizadora 3er Congreso
Internacional de Ingeniería

Dr. Susébio Ventura Ramos
Jefe de la División de Posgrado
Facultad de Ingeniería



**Anexo 2. Publicación aceptada en la
revista International Review of
Automatic Control (I.RE.A.CO.)**

Dear prof. Ríos-Moreno,

It is my great pleasure to inform you that your paper (ID 1829) has been accepted and will be published on the *International Review of Automatic Control (IREACO)*

Congratulations !

If you want to publish the paper on the July issue of the Review, please, accomplish the following requirements as soon as possible.

Sincerely yours,

Anna Bosso

Head of the Editorial Staff

The prerequisites in order to publish your paper, are the following:

1. you should change the paper according to the following remarks of the reviewers:

1. At the beginning of the paper, before the Introduction section, a nomenclature section, not numbered, should be added with a list of all the symbols used in the equations 1 and 2, and their meaning.
2. In the section III. 2 you should more explain the followed criteria for positioning the daylight sensors as reported in fig. 5.
3. You have indicated with the same number 7 two different figures. You should re-number the figures.

2. you should complete and submit on-line, the ORDER FORM that can be found to the following web address: http://www.praiseworthyprize.it/order_form.html

3. you should complete, sign and return, by fax, to the number +39 0810360768 the following documents (SEE THE ENCLOSED FILES):

3.1 copy of the ORDER FORM (also by fax);

3.2 copy of the COPYRIGHT FORM;

3.3 copy of the TREATMENT OF PERSONAL DATA.

3.4 eventually a copy of the PERMISSION REQUEST FORM for the reproduction of any figure, table or extensive (more than fifty words) extract from the text of a source that is copyrighted or owned by a party other than Praise Worthy Prize or of the Author;

4. You or your organization should buy 4 copies of the Review issue to cover part of the publication cost.

The payment should be made by **three ways**:

4.1. by **bank transfer**.

ABSOLUTELY IT IS NOT POSSIBLE TO PAY WITH INTERNATIONAL CHECK OR MONEY ORDER/ BANK DRAFT.

Bank transfer information:

Name of Account: Praise Worthy Prize s.r.l.

Account #: 052895878840

IBAN #: IT 87 U 03049 03401 052895878840

Bank Name: Banca Sella Sud Arditi Galati, Agenzia n°5, via Alvino, 63 - I80127 Napoli, Italy

Swift Transfer Code: BRDGIT33XXX

NOTE:

- **Bank transfer payments will be charged in Euros only.**
- **The bank transfer cost must be added to the cost of the four copies of Review issue.**
- **You must include the following information on your bank transfer documents:**

- Name of the corresponding Author
- Paper Number

4.2. by **credit card**

In this case you should cross this modality on the order form and I will send you an email with a link in order to pay the amount by credit card.

4.3.. by **Western Union** addressing the payment to :

**Anna Bosso
Piazza G. D'Annunzio 15,
80125 Napoli-Italy**

PRAISE WORTHY PRIZE S.r.l.
PUBLISHING HOUSE
Editorial Staff

editorialstaff@praiseworthyprize.com

+++++ ATTENTION +++++

This e-mail is directed uniquely to the interested party,
which is the exclusive addressee of any information contained herein.
For any abuse about the content of this message,
Praise Worthy Prize S.r.l. will claim compensation for damages occurred to third parties as well.
In case the e-mail should be addressed to other than you, or the content should reveal
any transmission errors or manipulations, please contact us
at the following address: info@praiseworthyprize.it

Lighting Automatic Control System for Intelligent Buildings

R. Luna-Rubio¹, G. Herrera-Ruiz¹, M. Trejo-Perea¹,
D. Vargas-Vázquez¹, G.J. Ríos-Moreno¹

Abstract – This paper presents an alternative for electrical energy saving in the classrooms, by applying an automatic lighting control system. By using daylighting control, this system offers visual comfort inside these rooms (according to standard IEC-12464). Three lighting different systems were compared: a conventional system, a system with a schedule control (automatic on-off), and a system with an automatic daylighting control (based on fuzzy logic). Using the system with a schedule control as a reference, test and simulations results showed that with the automatic dimming control system not only is wasted energy reduced, but also usual consumption decrease by more than 50%. Such a system may serve as a platform to be used throughout the Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.

Keywords: Energy savings, lighting control, visual comfort, fuzzy logic, intelligent building

Nomenclature

$\mu_A(x)$	membership function for triangular fuzzy set
$\mu_B(x)$	membership function for trapezoidal fuzzy set
x	crisp measured value used in membership functions
A_1, A_2, A_3	constants used in membership function for triangular fuzzy set
B_1, B_2, B_3, B_4	constants used in membership function for trapezoidal fuzzy set

I. Introduction

In recent decades, due to modern lifestyles and the growing world's population, demand for energy has reached exponential increase; if this trend continues it is possible that demand exceeds supply capacity [1]-[3]. In process of power generation, annually are generated in the world millions of metric tons of greenhouse gases responsible for global warming [1], [3]-[6]. Recent research shows the use of clean energy for sustainable development as an alternative to reducing consumption of fossil fuels, however, this represents a high cost and slow-growing use of these technologies [7]. Taking this into account, an optimal supply of electricity helps to curb the exponential growth of this resource. The so called 'intelligent buildings' a concept was stimulated by the development of information technology, in addition to providing comfortable work environment while seeking to optimize the use of electrical energy to minimize operating costs thereof [8].

Today, an intelligent building (IB) is composed of a set of dynamic and responsive systems designed to meet the requirements of end-user, in order to provide productive and profitable operating environments [9]-[12].

The lighting control systems are part of an intelligent building, these systems must be dynamic and flexible to adapt to lighting conditions in order to maximize the natural light to ensure visual comfort to the users [13]. So, the electrical and natural light sources have to be controlled to provide adequate lighting on cloudy days when there is not enough sunlight. A control system consisting of light sensors coupled with dimmable electronic ballasts can adjust the artificial illumination levels within the building during the presence of natural light [14].

On the other hand, biomedical studies have shown that light has a wide range of effects on human physiology and behavior; for example, by affecting the central nervous system and regular periods of sleep [15], [16].

Based on the literature presented so far, this paper propose the implementation of an automatic lighting system based on fuzzy logic for intelligent buildings within a classroom, which seeks to optimally manage the building power in order to control the operation luminaires without affecting visual comfort of users according to international standard UNE-EN 12464 [17], thus providing a productive work environment and low cost.

II. Theoretical Considerations

As an important branch of fuzzy set theory, control techniques based on fuzzy logic have been widely used since the invention of the first fuzzy controller in 1974 [18], because its implementation it is not necessary to know the mathematical model of the plant to control, in addition control of non-linear plants like IB's systems, fuzzy control techniques has shown better performance than classical controllers [19]-[21]. Fuzzy theory should be seen as methodology to generalize any specific theory from crisp (discrete) to continuous (fuzzy) form [19]. The fuzzy control is an intelligent control technique that mimics the human reasoning [22], this control is based on human-expert knowledge, which is farmed in the set of linguistic rules for controlling the process [19], e.g. **IF** indoor lighting level is low **AND** outdoor lighting level is low **THEN** the electrical power lamp output is high in this example conditional **IF** is used to evaluate indoor and outdoor lighting level in the form of a fuzzy specification of measured values. The conclusion (THEN-part) specifies a corresponding fuzzy output value. For the development of automatic control based on fuzzy logic, there are three basic elements [23], [24]:

1. Fuzzifier.
2. Fuzzy inference engine.
3. Defuzzifier.

II.1. Fuzzifier

This element relate a measured value x with a degree of membership $\mu(x)$ called a fuzzy set, which gets a new quantification of the variable x in terms of linguistic expressions (e.g. High, Medium, Low). For the present study two types of fuzzy sets are considered (see Fig. 1).

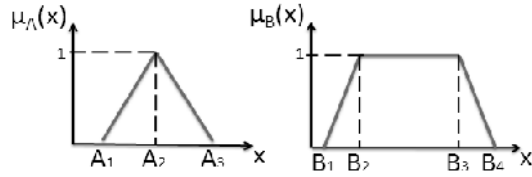


Fig. 1. Fuzzy sets to consider, at left triangular set and at right trapezoidal set

Membership functions $\mu(x)$ for these sets are:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & , x = A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_2 - A_1} & , A_1 < x < A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_3 - A_2} & , A_2 < x < A_3; \\ 0 & , \text{in other case} . \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & , B_2 \leq x \leq B_3; \\ 1 - \frac{|B_2 - x|}{B_2 - B_1} & , B_1 < x < B_2; \\ 1 - \frac{|x - B_3|}{B_4 - B_3} & , B_3 < x < B_4; \\ 0 & , \text{in other case} . \end{cases} \quad (2)$$

Where x is the crisp measured value.

II.2. Fuzzy Inference Engine

In this part, through a sequence of inference rules of type <IF ... THEN>, setting up the output controller in terms of fuzzy sets. To generate a figure that takes a corrective action in the system to control, it is necessary to perform the inverse process achieved in fuzzifier element.

II.3. Defuzzifier

This component performs the inverse process done in fuzzifier element, given a degree of membership of different output fuzzy sets, the defuzzifier assign a crisp value or figure corresponding to output controller, the defuzzifier most commonly used is the gravity center (GC) method due to the higher degree of accuracy [25]-[26]. In this work, due to its calculation simplicity the used defuzzifier is the center-average algorithm, which is outlined in Fig. 2.

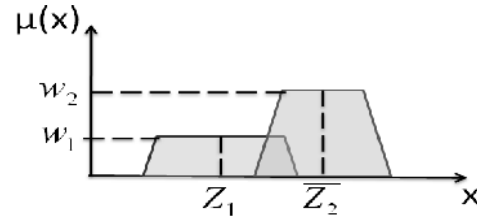


Fig. 1. Defuzzifier average of the centers

III. Materials and Methods

III.1. Building Characteristics

The procedure was carried out in the graduate building of the Engineering at the Querétaro State University; the building is show in Fig. 3. The structure of the building has five classrooms, a meeting room and a control room.



Fig. 3. Building subject to experimentation

A schematic plan view of one of these units shows the relative position of the rooms, doors; windows and overhangs, in addition to the overall dimensions. Four classrooms that have a covered area of 48 m²; one classroom has an area of 40 m²; and the meeting room with a covered area of 56 m², and a control room of 16 m², with a corresponding height of all them was 3 m (see Fig. 4).

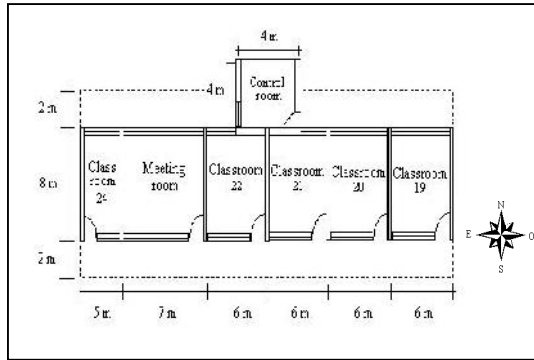


Fig. 4. Plan view of the building

The building is a single-level in order to provide better lighting; the design has two windows, one at north and one at south with dimensions of 4 m long and 2 m high, and a thickness of 5 mm, which, augurs a good use of daylight [28], [29].

Currently, the building has an electrical energy quality monitoring system called MonitoUAQ, which monitors energy consumptions in the study classrooms throughout the day. In addition to monitoring energy, MonitoUAQ system is also capable of keeping track of electrical output at different sampling periods; in this case, sampling period is adjusted every 5 minutes [29].

To provide thermal comfort, in previous studies have been calibrated thermal models of the building by means of autoregressive models [30].

III.2. Lighting system

For the lighting system tests were used analog ballasts model QTP2X32T8/127 DIM-B, which were imported by OSRAM México. This device offers a power factor (PF) greater than 0.99, low total harmonic distortion (THD) less than 10%, adjusted from 5 to 110%, is fast ignition ballast for two T8 fluorescent lamps 30W.

To estimate the potential energy savings by using daylight, a pilot system was implemented in classroom [29]. For lighting monitoring has been used the daylight sensors SFH5711; one of main features of this sensor is the perfect match with spectral sensitivity with the human eye. In other words, sensor has been designed to detect brightness in the same way as human eye do.

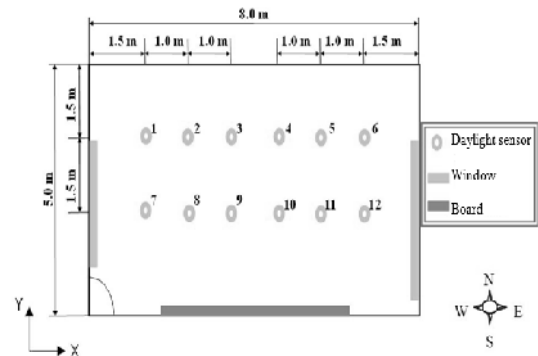


Fig. 5. Layout of sensors used to monitoring amount and distribution of light in the classroom 21

The amount and distribution of daylight in workplace, has been monitoring by means 12 daylight sensors distributed in the way indicated in Fig. 5. Daylight sensors were placed and distributed over student's workbench's at the same way that students commonly do, in this form we measure daylight intensity in workplace. To ensure visual comfort at indoor classrooms, we need to supply in workplace lighting levels between 200 lx and 600 lx, according to international standard UNE-EN 12464 [17].

To monitoring indoor lighting, an additional sensor (13th sensor) was installed at the center of the room and another one was installed above the classroom roof in order to measure the outdoor daylight (see Fig. 6).

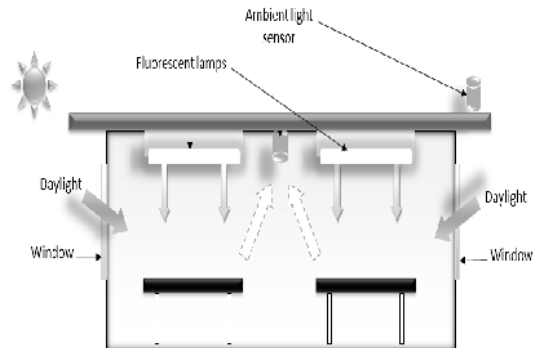


Fig. 6. Sensors used to measure internal and external light

Ballasts and sensors are controlled by one PC installed in the control room of the building under study. This communication process was carried out by means of wireless communication modules represented with blocks MCU_X in Fig. 7; this system has embedded a microcontroller and a TRF24G wireless communication module created by LAIPAC.

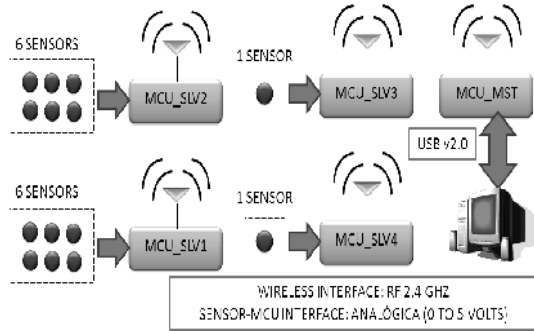


Fig. 7. Designed daylighting monitoring system

The recording of energy consumption by the ballasts throughout the day is done via the MonitoUAQ system [29] installed in the control room Fig. 4.

III.3. Quantifying electrical saving

Finally, the system before described was controlled under three operating conditions; the energy consumption was monitored and recorded in MonitoUAQ system. These consumptions were defined as follows:

a) *Consumption with conventional operation:* Measurements in the consumption of electricity were performed when the lights were operated normally by users through the on-off switch in the classroom. In this operation mode, it should be noted that there are many cases where the light is activated even if not required; this due to the presence of natural light into the classroom or because the classroom is empty, which represents an unnecessary expense, due to inefficient operation conditions.

b) *Consumption with schedule control (automatic on-off):* In this case, a cut is made in the energy supply according to a predetermined schedule criterion. That is, users can perform operations ignition-off of the lights in the normal way, but only in the programmed schedules. Outside those hours, power is turned off in order to avoid energy waste in those cases where users forgot to turn the lights off.

c) *Consumption with an automatic dimming control (based on fuzzy logic):* In this case, besides conducting an automatic on-off of the energy supply, the ballasts are operated in such a way that they can provide the percentage of light needed to keep the optimums lighting conditions and comfort.

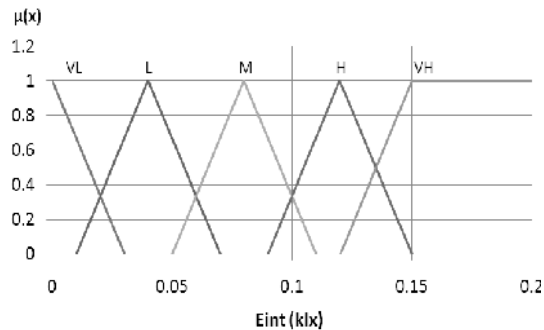
Three previous cases measurements were performed on one week (Monday to Saturday), with the objective of obtaining consumption data for quantifying the electrical energy consumption.

III.4. Dimming control based on fuzzy logic

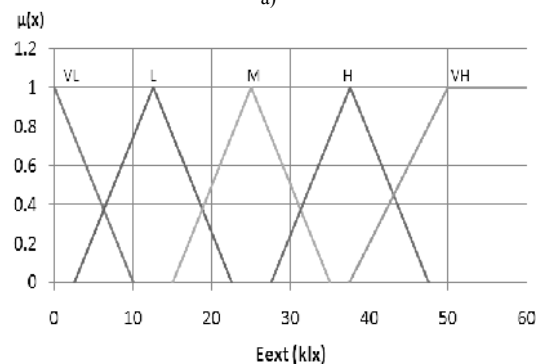
Dimming control of lamps is based on logic fuzzy, where the inputs are internal and external classroom

lights measured using sensors showed in Fig. 5 and Fig. 6, whereas the control output is turn-on percent of lamps. Fuzzy control is composed of three parts: the first is the fuzzification process, where measured inputs are transformed to linguistic expressions; the next part is the inference process, where it is generated a fuzzy control input based on fuzzy relations and inference rules; finally the last part of fuzzy control is defuzzification process, where it is converted fuzzy values obtained in previous process into defuzzifier turn-on lamp value.

After a study of inputs behavior and the relation between turn-on percent of lamps on light incident in workplace (sensors 1 to 12 in Fig. 5) the following fuzzy logic controller has been proposed. For the fuzzification and defuzzification process, the linguistic set of membership functions is: very low (VL), low (L), medium (M), high (H) and very high (VH). For controller inputs we have proposed indoor (E_{int}) and outdoor (E_{ext}) lighting level, its membership functions are detailed in Fig. 8 (a) and (b).



a)



b)

Fig. 8. Membership functions of controller inputs. a) Membership functions of indoor lighting level (E_{int}). b) Membership functions of outdoor lighting level (E_{ext})

For inference defuzzification process, the membership function is expressed in Fig. 9; in this case for the output controller we have the electrical power lamps output.

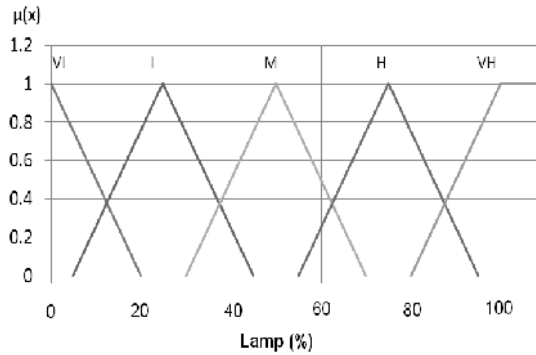


Fig. 9. Membership functions of controller outputs

Finally, according with standards for illumination in work places UNE-EN 12464 [17], in order to provide optimum level of illumination we need a range of 200lx to 500lx inside of classroom. With basis on the last standard and considering illumination behavior previously observed, the inference rules were proposed (see Table I).

TABLE I

THE TRUE TABLE SHOWS THE FUZZY CONTROL RULES WHICH RELATE WITH THE LOGIC OPERATOR “AND” THE OUTDOOR (E_{ext}) AND INDOOR (E_{int}) LIGHTING LEVEL WITH THE OUTPUT LAMPS POWER MEASURED IN FUZZY VALUES

E_{int}	E_{ext}				
	VL	L	M	H	VH
VL	VH	VH	M	L	---
L	VH	H	VL	VL	VL
M	VH	L	VL	---	L
H	VH	L	L	M	VL
VH	VH	VL	VL	---	VL

The control surface for mapping of inputs and outputs is showed in Fig 10.

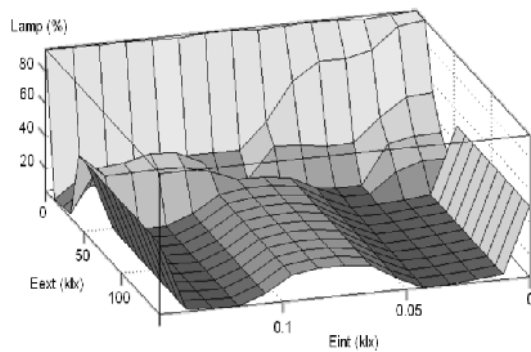


Fig. 10. 3D Control surface for mapping of inputs and outputs as fuzzy system implemented in an illumination fuzzy controller proposed

IV. Results and discussion

IV.1. Simulation results of dimming controller based on fuzzy logic

For evaluate the response of dimming controller, it was monitoring the daylight observed on the sensors mentioned previously (in section III.2) along 8:00 hrs to 20:00 hrs; on the other hand, it was measured the sensors response to turn-on percent lamp. With the data collected and taking in account the principle of superposition for light waves, the dimming controller based on fuzzy logic response has been simulated; the results obtained are showed in Fig. 11.

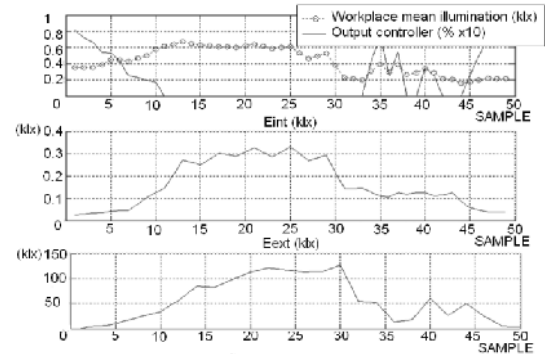


Fig. 11. Response of dimming controller observed in one day along 8:00 hrs to 22:00 hrs

According to work places illumination standard UNE-EN 12464 [17], inside classroom we need an illumination in 200lx to 500lx range; as we can see on Fig.11, the proposed controller achieve this requirement finally, energy consumption observed for conventional operation, schedule and dimming control are showed in Fig. 12 to 14.

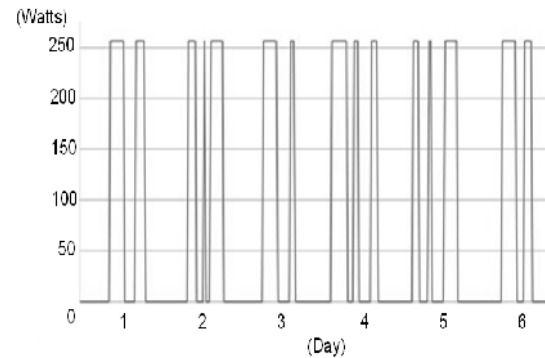


Fig. 12. Electrical consumption with conventional operation

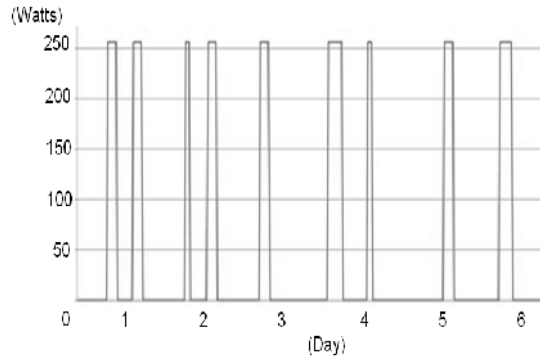


Fig. 13. Electrical consumption with schedule control

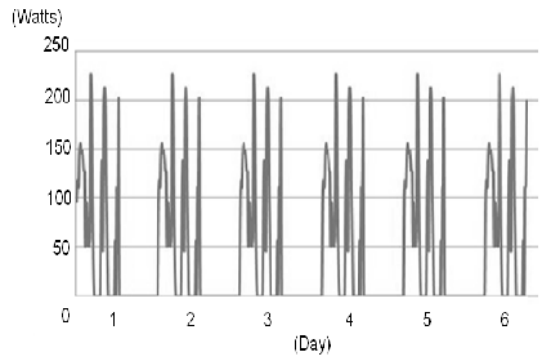


Fig. 14. Electrical consumption with dimming control

Finally, a comparative of energy consumption for the three systems along one week (Monday to Saturday) are depicted on Table II.

TABLE II
ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTIONS OF
THE LIGHTING SYSTEMS EVALUATED

Lighting system	Consumption kWh	Consumption %	Savings %
Conventional control	2.592	157	-57
Schedule control	1.653	100	0
Dimming control	0.774	47	53

As we can see, that the total energy consumption with conventional operation was 2.592 kWh, while consumption with schedule control was 1.653 kWh and consumption with dimming control shows a minimum consumption of 0.774 kWh, taking as reference schedule control consumption, energy savings obtained are showed in Table 2.

V. Conclusions

It was observed that by restricting control to users, we avoid the energy waste they generate when make a misuse of lamps. The preliminary testing of lighting automatic control system has been successful, with

greater potential savings to 50% of total electrical energy consumption as regards in terms of lighting; in addition it is worth noting that the savings achieved in no time compromised the comfort of users.

On the other hand, the automatic control of lighting system proposed allows us to easily extend to the rest of the building and even the rest of the school.

Acknowledgements

José Gabriel Ríos Moreno thanks FIFI for its financial support (contract 09-25) as well as Dr. Mario E. Rodriguez Gonzalez (UNAM-CFATA, México) for his collaboration in this project.

References

- [1] A.M. Omer, Energy, Environment and Sustainable Development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12(Issue 9): 2265-2300, December 2008.
- [2] K. Voorspools, Sustainability of the Future; Rethinking the Fundamentals of Energy Research, *Renewable and Sustainable Reviews*, Vol. 8(Issue 6):599-608, December 2004.
- [3] D.J. Lew, Alternatives to Coal and Candles: Wind Power in China, *Energy Policy*, Vol. 28(Issue 4): 271-286, April 2000.
- [4] G.M. Fürstenberger and M. Wagner, Exploring the Environmental Kuznets Hypothesis: Theoretical and Econometric Problems, *Ecological Economics*, Vol. 62 (Issues 3-4): 648-660, May 2007.
- [5] A. Bergmann, N. Hanley and R. Wright, Valuing the Attributes of Renewable Energy Investments, *Energy Policy*, Vol. 34(Issue 9):1004-1014, June 2006.
- [6] J. Di Stefano, Energy Efficiency and the Environment: the Potential for Energy Efficient Lighting to Save Energy and Reduce Carbon Dioxide at Melbourne University, Australia, *Energy*, Vol. 25(Issue 9):823-839, September 2000.
- [7] A. Midilli, I. Dincer, and M. Ay, Green Energy Strategies for Sustainable Development, *Energy Policy*, Vol. 34(Issue 18):3623-3633, December 2006.
- [8] J.K.W. Wong, H. Li, and S.W. Wang, Intelligent Building Research: a Review, *Automation in Construction*, Vol. 14(Issue 1):143-159, January 2005.
- [9] P.W. Wong, Y. Shimoda, M. Nonaka, M. Inoue, and M. Mizuno, Semi-Transparent PV: Thermal Performance, Power Generation, Daylight Modelling and Energy Saving Potential in a Residential Application, *Renewable Energy*, Vol. 33(Issue 5):1024-1036, May 2008.
- [10] D. Kolokotsa, K. Niachou, V. Geros, K. Kalaitzakis, G.S. Stavrakakis, and M. Santamouris, Implementation of an Integrated Indoor Environment and Energy Management System, *Energy and Buildings*, Vol. 37(Issue 1):93-99, January 2005.
- [11] E.L. Krüger, and P.H.T. Zannin, Acoustic, Thermal and Luminous Comfort in Classrooms, *Building and Environment*, Vol. 39(Issue 9):1055-1063, September 2009.
- [12] W.K.E. Osterhaus, Discomfort Glare Assessment and Prevention for Daylight Applications in Office Environments, *Solar Energy*, Vol. 79(Issue 2):140-158, August 2005.
- [13] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, and F. Topalis, Quantifying Energy Savings in Daylight Responsive Systems: The Role of Dimming Electronic Ballast, *Energy and Buildings*, Vol. 40(Issue 1):36-50, January 2008.
- [14] R. Luna Rubio, G.J. Ríos Moreno, G. Herrera Ruiz, M. Trejo Perea, D. Vargas Vázquez, , Lighting automatic control system based on fuzzy logic for intelligent buildings, *5th International Congress of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro*, Vol. 1, pp. 571-581, Querétaro, April 2009.
- [15] S.A. Jasser, J.P. Hanifin, M.D. Rollag, and G.C. Brainard, Dim Light Adaptation Attenuates Acute Melatonin Suppression in

- Humans, *Journal of Biological Rhythms*, Vol. 21(Issue 5):394-404, October 2006.
- [16] R.G. Stevens, D.E. Blask, G.C. Brainard, J. Hansen, S.W. Lockley, I. Provencio, M.S. Rea, and L. Reinlib, Meeting Report: The Role of Environmental Lighting and Circadian Disturbation in Cancer and Other Diseases, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 115(Issue 9): 1357-1362, September 2007.
- [17] International Electrotechnical Commission, Light and Lighting, Lighting of Work Places, British-Adopted European Standard. *UNE-EN 12464*, October 2003.
- [18] E.H. Mamdani, Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamics plant, *IEEE*, Vol. 121,pp. 1585-1588, December 1974.
- [19] M.T. Lah, B. Zupančič, J. Peternej, and A. Krainer, Daylighting illuminance control with fuzzy logic, *Solar energy*, Vol. 80, (Issue 3): 307-321, March 2006.
- [20] D. Kolokotsa, G. Saridakis, A. Pouliezios, and G.S. Stavarakakis, Design and Installation of an Advanced EIB Fuzzy Indoor Comfort Controller Using Matlab, *Energy and buildings*, Vol. 38(Issue 9): 1084-1092, September 2006.
- [21] D. Kolokotsa, Comparison of the Performance of Fuzzy Controllers for the Management of the Indoor Environment, *Building and Environment*, Vol. 38(Issue 12): 1439-1450, December 2003.
- [22] Z. Kovacic, and S. Bogdan, *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications* (Culinary and Hospitality Industry Publications Services, 2005).
- [23] R. Babuska, *Fuzzy Modeling for Control*. Norwell, MA, USA: (Kluwer Academic Publishers, 1998).
- [24] D. Dieder, and P.E. Henri, *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. New York: (Academic Press, 1980).
- [25] J. Jantzen, *Design of fuzzy controllers*. Technical University of Denmark: Technical Report No. 98-E 864, (Department of Automation, 1998).
- [26] K.M. Passino, and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. California: (An Imprint of Addison-Wesley Longman, 1998).
- [27] I. Škrjanc, B. Zupančič, B. Furlan, A. Krainer, Theoretical and Experimental Fuzzy Modelling of Building Thermal Dynamic Response, *Building and Environment*, Vol. 36(Issue 9):1023-1038, November 2001.
- [28] E. Ghisi, J.A. Tinker, An Ideal Window Area Concept for Energy Efficient Integration of Daylight and Artificial Light in Buildings, *Building and environment*, Vol. 40(Issue 1):51-61, January 2005.
- [29] M. Trejo Perea, G.J. Ríos Moreno, E.A. Rivas Araiza, and V. Rauch Sitar, Savings and analysis of the consumption and quality of the energy, *1st International Congress of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro*, Vol. 1, pp. 253-261, Querétaro, April 2005.
- [30] G.J. Ríos Moreno, M. Trejo Perea, R.C. Miranda, V. Guzmán, and G. Herrera Ruiz, Modelling Temperature in Intelligent Buildings by Means of Autoregressive Models, *Automation in Construction*, Vol. 16(Issue 5):713-722, August 2007.

Authors' information

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro, Qro., México.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro, Qro., México.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro, Qro., México.

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro, Qro., México.

⁵ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro, Qro., México.



Ricardo Luna Rubio was born in Querétaro city, Mex. in 1983. Won the title of engineer in automation with terminal line in mechatronics systems by the Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) in 2006. He is currently studying an MSc in terminal line instrumentation and control in the division of graduate studies of UAQ, his area of study are working in lighting systems for intelligent buildings. Ing. Ricardo Luna actually is member of the group of research on intelligent buildings of the Facultad de Ingeniería.



Gilberto Herrera Ruiz received the engineering Ph.D. degree from the Hungarian Academy of Sciences in 1992. His research interests include control, manufacturing systems, machine tools and technologies for greenhouses. He is currently professor researcher at the Universidad Autónoma de Querétaro. Dr. Gilberto Herrera is currently member of the National System of Researchers (SNI), CONACYT, México.



Mario Trejo Perea was born in Querétaro, México in 1968. He received B. S and M. S in automatic control from the Universidad Autónoma de Querétaro, Mexico in 1994 and 2005 respectively. He received his Ph.D. degree from the same institution in 2009. He has published some scientific papers in journals and presented conferences on energy consumption prediction using neural networks models and he joined in 1994 to the Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro Mexico, where he is actually a researcher professor. Dr. Trejo is a member of IEEE and Instrumentation and Measurement Society his area of interest is development of models prediction load in intelligent buildings.



Damian Vargas Vázquez was born in Querétaro, Mexico in 1973. He received the diploma of "Electronic Engineer" at "Instituto Tecnológico de Querétaro" (México) in 1995. He got a Master's degree in Instrumentation and Automatic Control at the "Universidad Autónoma de Querétaro" (Mexico) in 2000, and a Ph.D. in Computer Science at the "Universidad Politécnica de Madrid" (Spain) in 2007. He joined in 2007 to the Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro México, where he is currently a researcher professor in image processing and analysis field, particularly in illumination and mathematical morphology areas.



José Gabriel Ríos Moreno was born in Querétaro, México in 1977. He received the B.S and M.S. degrees in Automatic Control from the Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México, in 2003 and 2005 respectively. He received the Ph. D. in intelligent buildings at the Universidad Autónoma de Querétaro, México. He is currently Professor of the Facultad de Ingeniería at the Universidad Autónoma de Querétaro, México. His research interests include thermal modeling and automatic illumination control for intelligent buildings. Dr. Gabriel Ríos is currently member of the National System of Researchers (SNI), CONACYT, México.