



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Especialidad: Automatización

Sistema de control automático de iluminación para lámparas fluorescente

TESIS

Que para obtener el Título de

Ingeniero en Automatización, con línea Terminal en Sistemas Mecatrónicos

Presenta:

Ricardo Luna Rubio

Dirigido por:

M. en C. José Gabriel Ríos Moreno

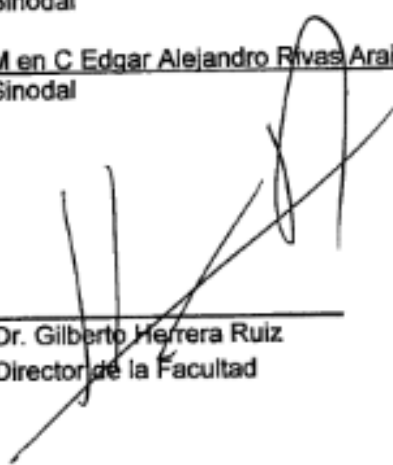
SINODALES

M en C José Gabriel Ríos Moreno
Sinodal

M en C Mario Trejo Perea
Sinodal

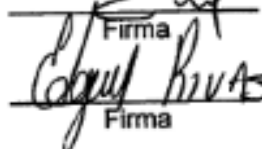
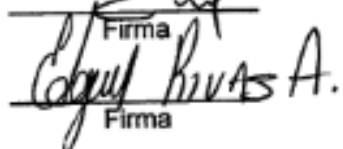
M en C Manuel Toledano Ayala
Sinodal

M en C Edgar Alejandro Rivas Araiza
Sinodal


Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
04/06/07
México


Firma

Firma

Firma

Firma

Biblioteca Central
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

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.

RESUMEN

Con el presente trabajo se pretende ofrecer una alternativa de ahorro de energía eléctrica en los salones de clases de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), al implementar de manera experimental, un sistema de control automático de iluminación para lámparas fluorescentes, el cual, en función de la cantidad de luz de día presente en el interior de los salones, entregue un nivel de iluminación suficiente para realizar de manera eficaz las actividades al interior de los mismos, dicho sistema podrá servir como plataforma para ser implementado en el resto de la Facultad de Ingeniería. Para evaluar el ahorro energético que genera la alternativa propuesta, se compararon tres sistemas de iluminación, uno con operación convencional (encendido-apagado manual), un sistema con un control horario (encendido-apagado automático) y un sistema con un control de intensidad regulable automático. Tomando como referencia el sistema con el control horario, los resultados obtenidos mostraron que con el sistema de control regulable automático, además de eliminar el desperdicio de energía registrado en el sistema bajo operación convencional, es posible lograr un ahorro en el consumo de energía eléctrica superior al 50%.

(Palabras clave: Ahorro de energía eléctrica, control de intensidad regulable automático, lámparas fluorescentes, confort)

SUMARY

This work is intended to offer a choice for electric power saving in the Engineering Faculty of the Universidad Autónoma de Querétaro by introducing, in an experimental way, an automatic control system of illumination for fluorescent lamps which, based on the amount of daylight inside the classrooms, can produce enough lighting to perform indoor daily activities in an effective way; the system could be used as a basis to be implemented all over the Faculty. In order to evaluate the power saving produced by this alternative, three illumination systems were compared: a typical performance system (manually on-off), an hour-control system (automatic on-off) and an automatic dimming control system. Taking as a basis the hour-control system, the outcome showed the automatic dimming control system, besides eliminating energy waste compared to the typical performance system, allows obtaining an electric power saving over 50%.

(Keywords: Electric power saving, automatic dimming control, fluorescent lamps, comfort).

A Esperanza Rubio Suárez

AGRADECIMIENTOS

A J. Gabriel Ríos, Edgar A. Rivas, Mario Trejo y Manuel Toledano, por sus valiosas observaciones, guía y ayuda desinteresada brindadas para la elaboración del presente trabajo, así como también, por su apoyo, confianza y amistad depositadas en mi persona a lo largo de prácticamente toda la licenciatura.

Gracias a Fausto H. García, por su colaboración en las traducciones necesarias para la presente tesis.

Finalmente, gracias tanto a Gilberto Herrera como a Rodrigo Castañeda por el apoyo y las facilidades brindados para la implementación de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
SUMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo	4
1.3. Justificación	4
2. SISTEMAS DE REGULACIÓN	6
2.1. Lámparas fluorescentes	6
2.1.1. Funcionamiento	7
2.1.2. Balastro o laste eléctrico	8
2.2. Maximizando la eficiencia y calidad	8
2.2.1. Estrategias	10
2.2.2. Regulación de luminarias	11
2.3. Sistemas de regulación analógicos vs digitales	12
2.4. Buses de campo	15
2.4.1. Red 1 Wire	16
2.4.2. MODBUS	17
2.4.3. ZigBee	18
2.4.4. DALI	19
2.5. Comparación entre los buses mencionados	22
2.6. Técnica de diseño para balastros electrónicos	23
3. DESARROLLO DEL SISTEMA	26
3.1. Características del edificio	26

3.2.	Características del sistema de iluminación	27
3.3.	Red propuesta	29
3.4.	Dispositivos propuestos	31
3.5.	Monitoreo de los consumos de energía	31
3.6.	Puente de comunicación RS-232/DALI	32
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS	34
4.1.	Monitoreando los niveles de iluminación	35
4.2.	Cuantificando el ahorro energético	35
4.2.1.	Consumo con operación convencional	36
4.2.2.	Consumo con control horario	37
4.2.3.	Consumo con control de intensidad regulable automático	38
4.3.	Comparando resultados obtenidos	39
5.	Conclusiones y trabajos futuros	41
6.	Referencias	42
7.	Apéndice	44
A.1.	Comandos del puente de enlace RS-232/DALI	44
A.2.	Circuito del puente de enlace	45
A.3.	Eficiencias de balastros regulables de hoy en día	46
8.	Anexos	47
Anexo 1.	Carta de aceptación del artículo enviado al 3er Congreso Internacional de Ingeniería	47
Anexo 2.	Reconocimiento obtenido en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería	48
Anexo 3.	Artículo publicado en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería	49

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro

I	Características de lámparas	6
II	Fuentes emisoras de CO2 en México	9
III	Desglosamiento de fuentes generadoras de CO2 en el sector energético en México	9
IV	Niveles de iluminación recomendados (footcandles)	10
V	Comparación del desempeño para varias opciones de actualización.	11
VI	Resumen de características de las tecnologías de red revisadas hasta el momento	22
VII	Comparación de resultados obtenidos.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura

1	Funcionamiento lámpara fluorescente.	7
2	Sistema de iluminación basado en balastos analógicos	13
3	Sistema de regulación automático para un nivel de luz constante	14
4	Diagrama de una red de trabajo IBECS	16
5	Red de dispositivos utilizando MODBUS	18
6	Típico sistema de regulación que utiliza balastos digitales	21
7	a) Edificio sujeto a experimentación. b) Vista de planta del edificio.	26
8	Compensación de la luz natural por la luz artificial.	28
9	Componentes del sistema de control de iluminación regulable automático	29
10	Topología de la red a implementar	30
11	Diagrama a bloques del sensor y balastro digital	31
12	Sistema propuesto para evaluar el ahorro energético	32
13	Disposición física del fotosensor así como distribución prevista de la luz	35
14	Consumo eléctrico con operación convencional	37
15	Consumo eléctrico con control horario	38
16	Consumo eléctrico con control de intensidad regulable automático.	39

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

De acuerdo a un análisis realizado recientemente por el periódico Reforma en el pasado año (Vela et al., 2006), el gobierno foxista heredó a los mexicanos el mayor encarecimiento que ha tenido la electricidad en un sexenio. Dicho análisis muestra que las tarifas de electricidad aumentaron un 32% en términos reales de 2000 a 2006. 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.

Por otro lado, en un 90% de los procesos actualmente empleados para la generación de energía eléctrica en el mundo, es requerida la extracción y combustión de combustibles fósiles (Di Stefano, 2000), con lo cual, anualmente en el mundo se generan miles de toneladas métricas de gases invernadero responsables del calentamiento global (Mills E. et al., 2002), esto hace ver que quizá el utilizar plantas de emergencia para combatir el incremento en las tarifas de energía eléctrica, no sea la opción mas sana para el bienestar mundial, si no mas bien, una mejor alternativa podría ser el buscar formas de generación de energía eléctrica que sean mas limpias (con menor generación de gases invernadero), ó bien incrementar la eficiencia en el consumo o generación de energía eléctrica, para así de esta manera reducir la producción de la misma y con ello reducir la generación de estos nocivos gases invernadero.

Para que el incremento de la eficiencia en el consumo de energía eléctrica tenga un impacto significativo, obviamente debe ser realizado en las áreas que representan un mayor consumo energético. En lo particular, con el presente trabajo buscamos ofrecer una alternativa de ahorro energético para la Facultad de

Ingeniería de la UAQ, en esta institución sin duda alguna, buena parte del consumo de energía eléctrica es realizado por el sistema de alumbrado.

Pero antes de seguir buscando alternativas que nos ayuden a lograr una mayor eficiencia en el sistema de alumbrado, vale la pena ver que tanto impacto podríamos lograr con esto. Para ello, es importante mencionar que alrededor del mundo en varios países, el blanco de mayor uso en políticas y campañas que de ahorro de energía eléctrica es precisamente el promover la renovación de los sistemas de iluminación con dispositivos con una mayor eficiencia energética (Mills E. et al., 2002), la implementación de estas campañas y políticas gubernamentales alrededor del mundo han arrojado resultados muy positivos, por ejemplo, en algunas partes del mundo se ha visto que mediante la sustitución de lámparas incandescentes por luminarias fluorescentes compactas (*Compact Fluorescent Lamps, CFL*) en el sector residencial, es posible reducir la generación de gases invernadero a un costo de US\$5 – US\$10 / Ton (Martinot et al., 1998), un ejemplo de programas gubernamentales orientados a mejorar la eficiencia en las luminarias, es el siguiente; en el estado de Nueva York, EEUU, a mediados de los 90's, la "New York Power Authority" (NYPA) implementó un programa denominado "High Efficiency Lighting Program" (HELP), el cual buscaba incrementar la eficiencia en el consumo de energía eléctrica en edificios públicos y escuelas del estado, mediante el reemplazo de balastos magnéticos, por los novedosos balastos electrónicos de alta eficiencia para lámparas fluorescente logrando con esto un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica (Melhorn et al., 1995).

Tomando en cuenta de lo anterior, 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 (Ghisi et al., 2005), o modelando la distribución de luz de día al interior de los edificios (Syed et

al., 2004), así como también haciendo análisis numéricos de consumo de exergía (Asada et al., 1999).

Por otro lado, no conformes con las mejoras en la eficiencia energética lograda por los fabricantes de balastos para lámparas fluorescentes, aparecieron en el mercado recientemente algunos balastos electrónicos que ofrecen una característica interesante que es la posibilidad de regular la intensidad lumínica de las lámparas, gracias a esto, en una búsqueda por lograr un mayor ahorro energético, 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 (Harrison et al., 1998). 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).

Por otro lado, esta idea de aprovechar la energía que gratuita que nos ofrece el medio ambiente, ha sido utilizada no sólo en sistemas de iluminación, sino también en sistemas de HVAC (*Heating and Ventilating Air Conditioning*), sin embargo, de acuerdo a estudios realizados, dependiendo de las características del edificio, de los dos sistemas mencionados, el de iluminación puede lograr mayores ahorros energéticos (Kolokotsa et al., 2005).

Si bien es cierto, los sistemas de iluminación regulables que aprovechan la luz de día, fueron diseñados en un inicio buscando un ahorro energético, estudios biomédicos de los últimos 50 años (Fernández et al., 2004), han demostrado que la calidad y cantidad de la iluminación influye directamente en el estado de ánimo, estado de ánimo y salud de las personas; por ejemplo la iluminación puede influir

en el sistema de alerta del ser humano, con esto es posible prevenir graves accidentes si la persona se encuentra realizando actividades riesgosas, como puede ser el operar una máquina en la industria. En la escuela o el trabajo, la calidad de la iluminación puede influir para que las personas estén mas atentas y a gusto con la actividad que se encuentren realizando, logrando con esto una mayor productividad en sus labores.

1.2. Objetivo

El presente trabajo pretende ofrecer una alternativa de ahorro en el consumo de energía eléctrica en los salones de clases de la Facultad de Ingeniería de la UAQ, al implementar de manera experimental, un sistema de control automático de iluminación para lámparas fluorescentes que aproveche la luz natural, sin comprometer el confort de los usuarios de los salones de clases.

1.3. Justificación

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 balastos 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 balastos presentan una mayor eficiencia que sus antecesores.

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 eléctrica, 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.

2. SISTEMAS DE REGULACIÓN

En el presente capítulo se muestra las formas en la que actualmente se lleva a cabo el control de iluminación, las distintas alternativas con las que se cuenta, así como la forma en que el sistema de control interactúa con los sensores y actuadores del sistema.

2.1. Lámparas fluorescentes

Por otro lado, se encuentran las lámparas denominadas fluorescentes, las cuales debido que presentan mejores características ante otros tipos de luminarias (ver Cuadro I), son las luminarias de uso común en escuelas, oficinas, salas de conferencias, teatros, así como en la industria.

Cuadro I.- Características de lámparas

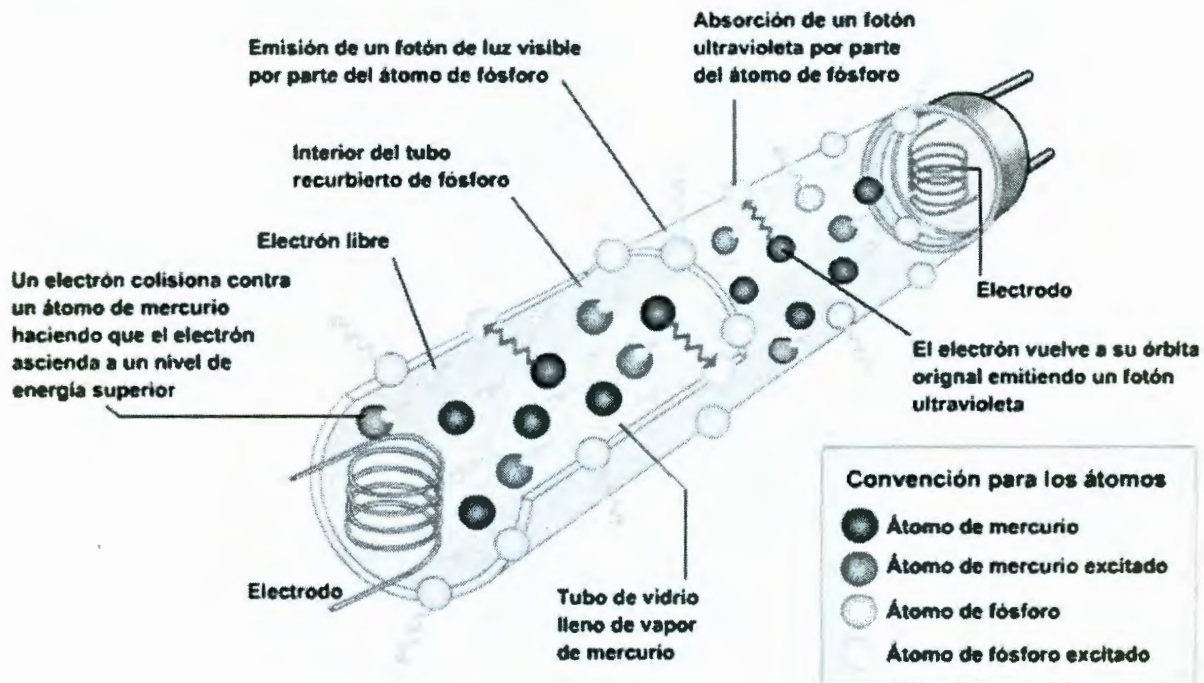
	Incandescente estándar	Fluorescente	Vapor de mercurio	Haluro metálico	Sodio alta presión
Potencia (W)	3 – 1,500	4 – 215	40 – 1,250	32 – 2000	35 – 1000
Eficacia del sistema (lm/W)	4 – 24	49 – 89	19 – 43	38 – 86	22 – 115
Vida promedio (hrs)	750 – 2,000	7,500 – 24,000	24,000+	6,000 – 20,000	16,000 – 24,000
Índice de rendimiento de colores (Color rendering index, CRI)	98+	49 – 85	15 – 50	65 – 70	22 – 85
Costo del ciclo útil	Alto	Bajo	Moderado	Moderado	Bajo
Tiempo de encendido a plena intensidad	Inmediato	0 – 5 segundos	3 – 9 minutos	3 – 5 minutos	3 – 4 minutos
Restrike	Inmediato	Inmediato	10 – 20 minutos	4 – 20 minutos	1 minuto
Mantenimiento de luminosidad	Bueno/excelente	Regular/excelente	Pobre/regular	Bueno	Bueno/excelente

Fuente: Energy Star® Building Manual, 2004

Las luminarias fluorescentes para funcionar requieren de un dispositivo eléctrico denominado balastro, actualmente, los balastros electrónicos convierten la corriente alterna de la línea de poder (50 a 60 Hz) a corriente directa, y luego a una señal de alta frecuencia (sobre 30 KHz) para operar la lámpara.

2.1.1. Funcionamiento

Son lámparas que contienen vapor de mercurio y un gas inerte (ver Figura 1), dentro de un tubo de vidrio a una presión ligeramente inferior que la atmosférica. El tubo de vidrio su interior, se encuentra recubierto por una fina capa de fósforo y otros elementos.



Fuente: Enciclopedia Wikipedia

Figura 1.- Funcionamiento lámpara fluorescente.

En los extremos del tubo de vidrio, se encuentran un par de electrodos hechos generalmente de tungsteno, los cuales presentan una resistencia eléctrica con pendiente negativa, es por ello que para que este tipo de lámparas funcionen, necesitan que sus electrodos sean excitados por medio de una tensión eléctrica suministrada a través de un balastro eléctrico, una vez que sucede esto, el filamento se calienta desprendiendo cierta cantidad de electrones que ionizan el gas inerte presente en el interior del tubo, formando de esta manera un plasma que conduce electricidad. Finalmente, este plasma generado excita al vapor de mercurio, produciendo radiación visible y ultravioleta. El recubrimiento presente en el interior del tubo tiene la función de filtrar y convertir esta radiación ultravioleta en

radiación visible, de esta manera, dependiendo del material con que se encuentre recubierto el interior del tubo de vidrio, será el color de la luz emitida por la lámpara fluorescente.

2.1.2. Balastro o laste eléctrico

Es un dispositivo que sirve para limitar la corriente eléctrica, el cual puede ser desde una simple resistencia variable, hasta un complejo dispositivo electrónico. Los balastros eléctricos son empleados para regular la intensidad luminosa de lámparas incandescentes, así como también para lograr que simplemente funcionen las lámparas fluorescentes. Este tipo de lámparas presentan una resistencia eléctrica negativa, de tal forma que si son alimentadas con una tensión eléctrica de manera continua, fácilmente se destruyen ya que la corriente que pasa por sus cátodos aumenta infinitamente, es por ello que, para que estas lámparas funcionen, es necesario el uso de un balastro que se encargue de conmutar la tensión de alimentación que reciben estas luminarias, ya que de esta manera se limita constantemente la corriente que circula por los cátodos de éstas lámparas, y con esto se evita que se destruyan.

2.2. Maximizando la eficiencia y calidad

En México, en el eje 4 del Plan de Desarrollo Nacional 2007 - 2012, se habla del cambio climático global debido al aumento en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), así como de la aportación nacional en la generación de esta clase de gases. Según datos mostrados en el documento mencionado, México se encuentra dentro de los 15 principales países generadores de GEI, al generar 643,183 millones de toneladas de CO₂, lo que representa una contribución del 1.5% de las emisiones globales de estos gases.

Cuadro II.- 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%

Fuente: Plan de Desarrollo Nacional 2007 – 2012, México

Como podemos apreciar en el Cuadro II, en México el sector energético es el que genera una mayor cantidad de GEI aportando un 61% del total que generó México en el 2002, de este porcentaje, si desglosamos las fuentes emisoras de CO₂ que forman parte de este sector (ver Cuadro III), la generación de energía eléctrica es la que tiene una mayor aportación de gases de efecto invernadero, al aportar un 24% del total de CO₂ generado en México durante el 2002.

Cuadro III.- Desglosamiento de fuentes generadoras de CO₂ en el sector energético en México

Fuente emisora de CO ₂	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%

Fuente: Plan de Desarrollo Nacional 2007 – 2012, México

Esto es algo que se repite en varios países del mundo, es por ello que los fabricantes de luminarias fluorescentes, en recientes años han realizado esfuerzos para ofrecer lámparas de mejor calidad con una mayor eficiencia energética (ver apéndice A.3), es por ello, que para lograr maximizar la eficiencia y calidad de la energía eléctrica es necesario actualizar los sistemas de iluminación ya instalados, por dispositivos que presentan mejoras en su diseño.

2.2.1. Estrategias

Para realizar esta actualización, es recomendable seguir las siguientes estrategias.

Conocer las necesidades: Antes de hacer una actualización del sistema de iluminación, es necesario, saber cuales 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 IV se muestran los niveles de iluminación recomendados para ciertas actividades.

Cuadro IV.- Niveles de iluminación recomendados (footcandles)

Clasificación	Lugar o tarea	Nivel de iluminación (fc)
A	Orientación circulación	2
B	Áreas públicas	5
C	Tareas simples	10
D	Tareas grandes buen contraste	30
E	Tareas pequeñas buen contraste	50
F	Tareas pequeñas contraste pobre	100

Fuente: Manual IESN, 9ª edición

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.

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, para entender mejor esto, en el Cuadro V.

Cuadro V.- 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 +50% de ahorro por "delamping*" Caso 4	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	27
Vatios de entrada (w)	184	156.4	120	60	60	50
Potencia total (kw)	2.208	1.877	1.440	0.720	0.720	0.600
Energía anual utilizada (kwh)	8,832	7,507	5,706	2,880	1,800	1,500
Costos						
Ahorros de energía (%)	N/A	15	35	67	80	83
Costo de operación anual (US\$)	833.70	750.74	576.00	288.00	212.40	177.00
Costo de actualización (US\$)	N/A	312	1,440	1,620	1,970	1,970
Ahorros						
Ahorros de energía (%)	N/A	15	35	67	80	83
Ahorros en costo de operación (%)	N/A	15	35	67	76	80
Tasa de retorno de inversion (años)	N/A	2.4	4.7	2.7	2.9	2.8
Tasa interna de retorno(10- años)	N/A	41%	17%	35%	32%	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

2.2.2. Regulación de luminarias

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.

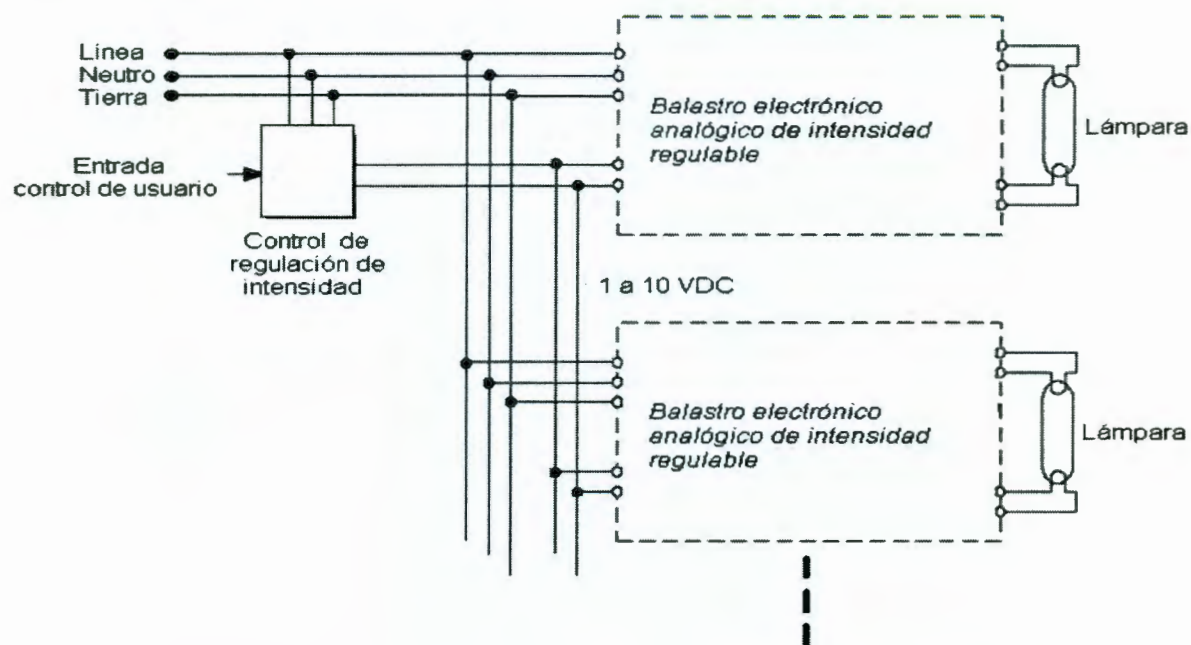
Para realizar el proceso de regulación, los balastos electrónicos reciben la señal de control por medio de algún protocolo de comunicación, el cual puede ser analógico o digital, dependiendo de esto, los balastos electrónicos son clasificados de una o de otra forma.

2.3. Sistemas de regulación analógicos vs digitales

Dependiendo de las características del edificio y las actividades que se realicen en el mismo, al diseñar el sistema de regulación ajustable, pudiera ser mas recomendable utilizar ya sea balastos electrónicos que empleen un protocolo de comunicación digital ó analógico, esto por los costos que implique la instalación del sistema, así como las necesidades del lugar, y las el cableado adicional que hay que hacer en la instalación eléctrica del edificio.

Por ejemplo, los balastos que utilizan señal de control analógica, generalmente reciben una señal estándar que varia entre 0 y 10 voltios, por lo que

tal y como se muestra en la Figura 2 además de las líneas de poder es necesario agregar a la instalación eléctrica un par de cables. Este tipo de balastos generalmente son conectados en paralelo (T. Ribarich et al., 2002), es decir la señal de control es común a todas las luminarias.



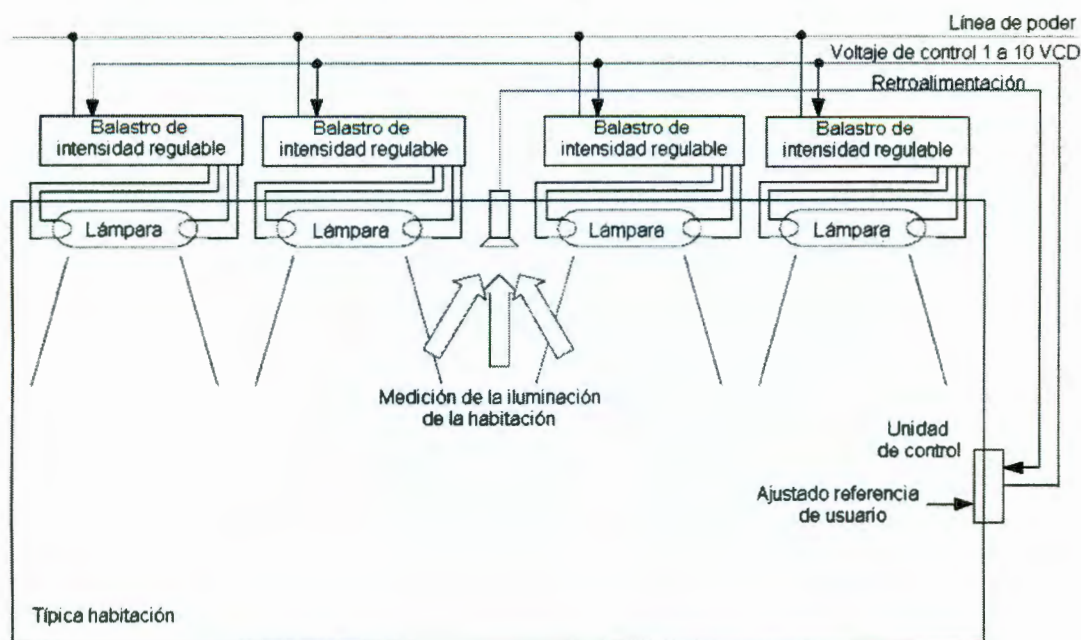
Fuente: Thomas J. Ribarich, International Rectifier

Figura 2.- Sistema de iluminación basado en balastos analógicos

En la Figura 2, podemos ver un sistema de iluminación regulable manual que emplea balastos analógicos, como podemos ver, aquí sólo es posible acceder al control de las lámparas desde un solo punto, por esta razón, es bueno utilizar este tipo de sistemas en salas de conferencias, gimnasios, o teatros, ya que todas las luminarias requieren la misma señal de control, así como también por lo general, en este tipo de lugares no es necesario acceder al control de la iluminación desde distintos puntos del edificio.

Al implementar un control de iluminación automático, como vemos en la Figura 3, solo hay que agregar un foto-sensor conectado a la unidad de control de las luminarias, la cual perfectamente puede estar montada en el muro de la

habitación, y donde los usuarios de pueden fijar el nivel de iluminación deseado al interior de la sala o cuarto.



Fuente: Thomas J. Ribarich, International Rectifie.

Figura 3.- Sistema de regulación automático para un nivel de luz constante

Cuando no sólo es necesario controlar el nivel de iluminación al interior del edificio, sino que también se requiere controlar la calidez de la luz, como lo puede ser el crear distintos efectos visuales como lo puede ser el lograr un atardecer artificial por ejemplo, o cuando se requiere tener acceso desde distintos puntos al control de las luminarias, el diseñar un sistema de iluminación con balastos analógicos resultaría un tanto complicado el cableado de las señales de control.

Cuando se tienen estas necesidades, es bueno emplear los balastos digitales, al hacerlo logramos una gran cantidad de beneficios ya que las luminarias son conectadas en una red de comunicación digital, esto proporciona al sistema de iluminación una gran flexibilidad, por ejemplo, al utilizar balastos digitales es posible direccionar las señales de control, logrando de esta manera un control mas preciso en la calidad de la iluminación pudiendo crear una gran

variedad de ambientes de iluminación artificiales, además de que es posible acceder al control de las luminarias desde distintos lugares y jerarquizar estos mandos. Otra característica importante de estos balastros es la posibilidad de almacenar niveles de iluminación en la memoria del dispositivo, y acceder a ellos y modificarlos cuantas veces sea necesario, además, al utilizar balastros digitales nos es posible conocer en cualquier momento el estado de la luminaria, es decir, si está encendida, apagada, el nivel de iluminación presente, así como también si la luminaria se encuentra fundida.

Dependiendo de las características del protocolo empleado para comunicar los balastros, será la capacidad de dispositivos que se puedan conecta a dicha red, además el alcance de la misma.

En nuestro caso, deseamos instalar un sistema de control automático para luminarias fluorescente en la Facultad de Ingeniería de la UAQ, dadas las características y necesidades de estos edificios, es necesario utilizar balastros digitales, ya que es necesario tener varias señales de control para los distintos salones y oficinas, además es necesario acceder al control de las luminarias desde distintos puntos como lo puede ser, el tener un control local para los usuarios del edificio como un control general.

2.4. Buses de campo

El control de los balastros digitales, como ya se había mencionado antes, se realiza por medio de algún bus digital conocidos como buses de campo. Para aplicaciones de control de iluminación, existen una gran variedad de alternativas de buses de campo que podemos emplear, así como también, se han hecho estudios para comparar características de estas opciones disponibles (Koch et al., 2005). Algunas de estas alternativas ya están bien establecidas en aplicaciones de control de iluminación, mientras que otras son alternativas emergentes que vale la

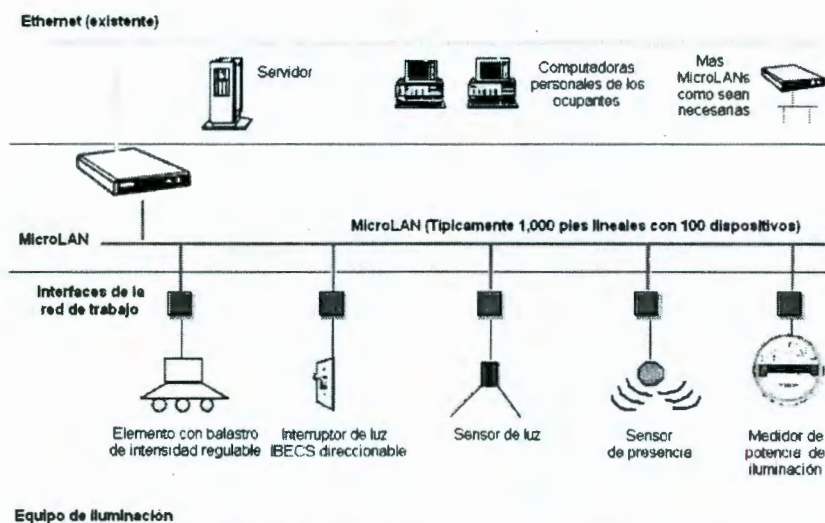
pena mencionarlas y comparar las características de las opciones de buses de campo que tenemos disponibles.

2.4.1. Red 1 Wire

La red de trabajo 1-Wire, fue originalmente desarrollado por Dallas Semiconductor (ahora Maxim), como un bus para construcción simple, para conectar dispositivos de bajo costo a una PC o a un microcontrolador, esta red algunas veces es etiquetada con el nombre de MicroLAN. El nombre de 1-Wire, deriva de el hecho que, todas las comunicaciones son hechas literalmente sobre un solo cable (en realidad en sobre 2 cables, uno de los cuales es tierra).

Maxim vende también, una gran variedad de chips que, dependiendo de nuestras necesidades, nos permiten crear una gran variedad de nodos en la red. Cada uno de estos chips son de bajo costo y nos permiten especificar el tipo de nodo a ser diseñado.

Enseguida, en la Figura 4 se muestra un diagrama de una red de trabajo IBECS™ (*Integrated Building Environmental Communications System*) que utiliza la tecnología 1-Wire.



Fuente: Francis Rubinstein, LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)

Figura 4.- Diagrama de una red de trabajo IBECS

Como podemos ver, una de las características importantes de 1-Wire, es que permite la integración de múltiples tecnologías de redes, además, gracias a que son accesibles chips que manejan el protocolo 1-Wire, es posible crear distintos tipos de nodos en la red para incorporar al sistema de iluminación diversos sensores, actuadores, y medidores.

2.4.2. MODBUS

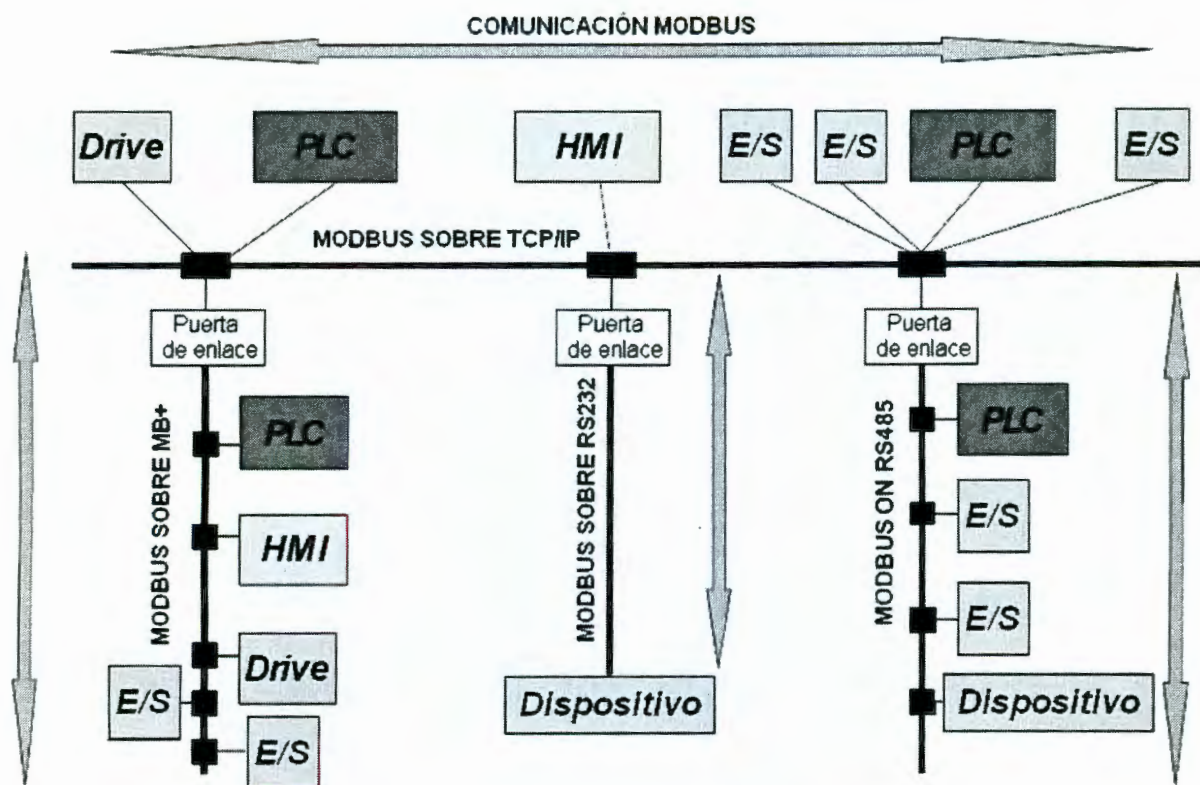
El protocolo MODBUS® es una estructura de mensajes desarrollada por Modicon en 1979, es utilizado industrialmente para establecer una comunicación del tipo amo-esclavo/cliente-servidor. Es uno de los protocolos más antiguos y de mayor uso en aplicaciones de automatización industrial, utilizado por miles de compañías en todo el mundo.

MODBUS es un protocolo de mensajes de la capa de aplicación, posicionado en el nivel 7 del modelo OSI, que provee una comunicación cliente-servidor entre dispositivos conectados en diferentes buses o redes.

Actualmente, MODBUS es implementado utilizando:

- TCP/IP sobre Ethernet
- MODBUS plus
- Transmisión serial asíncrona sobre una variedad de medios (cable: EIA/TIA-232-E, EIA/TIA-422, EIA/TIA-485-A, fibra óptica, radio, etc)

El diagrama de la Figura 5, muestra una red de dispositivos utilizando varias encarnaciones de MODBUS.



Fuente: Francis Rubinstein, LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)

Figura 5.- Red de dispositivos utilizando MODBUS

2.4.3. ZigBee

ZigBee es el nombre de una organización registrada, actualmente formada por más de 100 compañías. El objetivo de de ZigBee es desarrollar un protocolo de comunicación de radiofrecuencia a bajo costo, baja tasa de transferencia, y baja potencia, para ser utilizado en una gran cantidad de aplicaciones que incluyen:

- Automatización de construcciones
 - Seguridad.
 - HAVC.
 - AMR.
 - Control de iluminación.

- Control de acceso.
- Cuidado personal
 - Monitoreo de pacientes.
 - Monitoreo de salud
- Control industrial
 - Control de procesos
- Consumibles electrónicos
 - TV
 - VCR
 - DVD/CD
- PC y periféricos
 - Mouse
 - Teclado
 - Joystick
- Control comercial residencial/luz
 - Seguridad
 - HAVC
 - Control de iluminación
 - Control de acceso
 - Riego de jardines

2.4.4. DALI

DALI es el acrónimo en ingles de "*Digitally Addressable Lighting Interface*", como su nombre lo indica, el principal objetivo de este protocolo son las aplicaciones de iluminación. DALI se encuentra basado en el estándar técnico IEC 60929.

Investigaciones sobre este protocolo iniciaron a mediados de la década de los 90's, sin embargo el desarrollo de aplicaciones comerciales tuvo lugar en el verano de 1998.

Con la aparición de DALI, fabricantes europeos de balastros como Hüco, Philips, Osram, Tridonic, Trilux, y Vossloh-Schwabe, rápidamente han incluido este protocolo de comunicación en sus productos. Con esto, productos de diferentes fabricantes pueden ser interconectados e ínter operar sin problema alguno.

Al igual que los balastros analógicos, con el protocolo DALI es posible enviar al mismo tiempo una señal de control a un grupo determinado de balastros, además, tiene la capacidad de direccionar de manera individual las señales de control a cada dispositivo conectado a la red.

Otra ventaja que se adquiere al implementar una red DALI, es el hecho de que es posible conocer en cualquier momento el estado de la luminaria, es decir, es posible saber si la luminaria se encuentra encendida, apagada, que nivel de luminosidad presente, o incluso si se encuentra dañada. Esto de de gran utilidad en edificios grandes, donde se tienen instaladas un gran número de luminarias en lugares muy separados. Esta característica del protocolo DALI, es posible gracias a que el balastro es dotado de cierto grado de inteligencia al incrustarle un microprocesador.

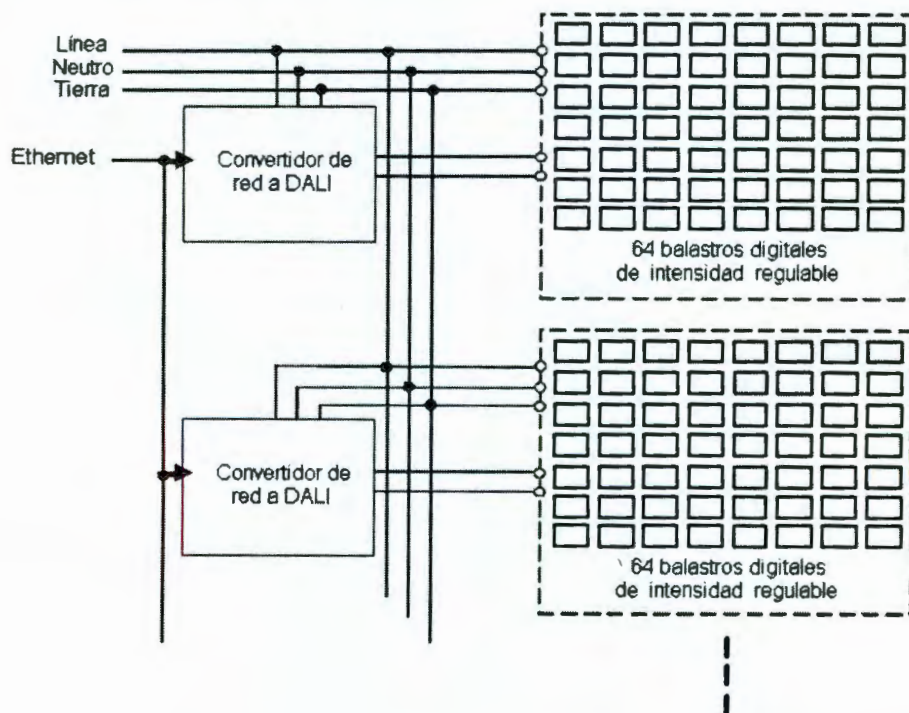
Gracias al microprocesador del balastro, es posible almacenar cierta información en el balastro, como lo puede ser el tiempo de encendido de la luminaria, o escenarios de iluminación, niveles máximo y mínimo de iluminación permitidos, y mandarlos llamar o modificarlos cuantas veces lo deseemos.

Aunque en un inicio, DALI fue creado para interconectar balastros, actualmente es utilizado para comunicar transformadores de bajo voltaje, células

PE, sensores de movimiento, interruptores de pared y puertas de enlace a otros protocolos.

Algunos comandos típicos utilizados en este tipo de red son: ve al nivel XX de iluminación, ve al nivel mínimo o máximo de iluminación, fija el valor XX como tiempo de regulación, enciende o apaga la luminaria, pregunta: ¿Qué nivel de iluminación tienes?, pregunta: ¿Cuál es tu estado?.

La topología de una red DALI es la de un bus, físicamente, la información viaja por dos cables, por lo que es empleada una comunicación amo-esclavo half-duplex. En una misma red DALI es posible conectar hasta 64 dispositivos, los cuales pueden ser agrupados en 16 grupos para direccionar una misma señal de control a todo el grupo, o direccionar de manera individual el control.



Fuente: Thomas J. Ribarich, International Rectifier

Figura 6.- Típico sistema de regulación que utiliza balastros digitales

Un ejemplo de un sistema de iluminación basado en el protocolo DALI, es el que se muestra en la Figura 6, como vemos es posible operar varias redes DALI a la vez, la interconectarlas a otra red como lo puede ser una Ethernet

2.5. Comparación entre los buses mencionados

Finalmente, se muestra una tabla comparativa de características importantes de los buses revisados hasta el momento (ver Cuadro VI) como lo son, la tasa de transferencia de datos, métodos de corrección de errores, seguridad, y topologías.

Cuadro VI.- Resumen de características de las tecnologías de red revisadas hasta el momento

	1-Wire Net	DALI	MODBUS (serial)	MODBUS (Ethernet)	ZigBee
Velocidad de red	9600 baudios ó 115 Kbaudios	2400 baudios	No tiene una velocidad especificada. La tasa de transferencia puede ser tan rápida como el protocolo RS232 o RS485 lo permita, i.e. 1 Mbps.	10Base2: 10Mbps 10BaseT: 10Mbps 100BaseT: 100Mbps	20Kbps, 40Kbps, 250Kbps dependiendo de la frecuencia
Control de error	CRC de 8 y 16 bits	Ninguno	CRC	Ethernet CRC	CRC
"Retardo"	Depende de la operación. Rangos de muy bajo a muy alto	Moderado a alto	Muy bajo	Muy bajo	Bajo a moderado (Típicamente 30ms)
Distancia de comunicación	Cientos de metros con un apropiado acondicionamiento de señal.	300 m o una caída de 2 voltios	Depende del canal serial físico. Pueden ser miles de metros para RS485	10Base2-185m 10BaseT-100m 100BaseT-100m	70m – 300m
Topología	Bus serial multi-drop half-duplex	Bus serial	Punto a punto o multi-drop	Multi-drop y estrella con hubs	Red inalámbrica Ad Hoc
Polarización de cable	Si	No	RS232-Si RS485-No	Si	No
Adopción en la Industria	Modesta	Muy buena	Extremadamente alta	Muy alta	Inicia
Seguridad	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	128 AES
Estándares	Ninguno	IEC 6029-2003 NEMA 242-2004	Modbus-IDA	Modbus-IDA	IEEE 802.15.4, ZigBee organización registrada.

Fuente: Ed Kouch, Controles Ackua

Como hemos visto, sólo el protocolo DALI fue creado originalmente para servir como una interfase de control con luminarias, el resto de los buses de campo aquí mencionados y que actualmente se utilizan para interconectar luminarias, originalmente fueron diseñados para interconectar una amplia variedad de dispositivos y por la misma razón, fueron creados para ser implementados en una amplia variedad de aplicaciones.

Todos los protocolos aquí mencionados cumplen la función de servir como un medio de enlace con las luminarias y sensores que necesitamos para realizar nuestro sistema de control automático de iluminación para lámparas fluorescente, sin embargo, el protocolo DALI, pese a que es relativamente nuevo, ha tenido una rápida aceptación por los fabricantes de balastos, lo que permite la interconexión e interoperatividad de este tipo de dispositivos de diferentes fabricantes.

2.6. Técnica de diseño para balastos electrónicos

Como ya se menciona, a mediados de los 90's se tuvo la necesidad de crear un protocolo de comunicación que interconectara los emergentes balastos electrónicos, como vemos, esta tecnología es relativamente nueva, por lo que el costo de este tipo de dispositivos es considerablemente alto, en la actualidad, dependiendo de el modelo de balastro, el costo del mismo puede variar entre 150 y 400 dólares americanos, esto dependiendo del protocolo bajo el cual reciba su señal de control, es decir, si es un balastro digital ó analógico, cada uno de estos balastos, como bien sabemos pueden controlar de una a dos lámparas. Para nuestra aplicación, requerimos instalar una cantidad considerable de este tipo de dispositivos, ya en un futuro no muy lejano, deseamos instalar el sistema automático de iluminación en toda la Facultad de Ingeniería de la UAQ, de comprar esta clase de balastos, el costo del proyecto se elevaría notablemente. En México, hoy en día, no existen fabricantes nacionales dedicados a la construcción de esta clase de dispositivos, por lo que tendrían que ser importados en su totalidad.

Por esta razón, aunque no forma parte del objetivo principal de este trabajo, se decidió ver cuáles son las técnicas comunes de diseño de esta clase de dispositivos, para de esta manera, diseñar nuestros propios balastros para abaratar los costos del proyecto.

Investigando un poco, encontramos que en el mismo año en que fue utilizado comercialmente el protocolo DALI, fue publicado un nuevo método de control para balastros electrónicos regulables de alta frecuencia (T. Ribarich et al., 1998). Dicho método ofrece una alternativa flexible, relativamente sencilla, y de bajo costo, para diseñar balastros para lámparas fluorescentes de una gran variedad de potencias y tamaños.

Esta técnica de diseño está basada en un chip creado por Internacional Rectifier, dicho circuito es el encargado de realizar la función de controlar la luminaria, el resto de los componentes son elementos sencillos como lo son resistencias, diodos, inductores, capacitares y transistores.

Con esta técnica, dependiendo de la potencia y tamaño de la luminaria, al diseñar el balastro básicamente sólo hay que modificar el valor de ciertas resistencias que fijan parámetros del chip. Esto nos brinda una gran facilidad y flexibilidad para el diseño de este tipo de dispositivos.

Además, una característica importante de esta técnica de diseño, es la retroalimentación obtenida del estado de la luminaria.

Este prototipo de balastro, únicamente reciben una señal analógica de regulación, la cual varía en el rango de 0 y 5 voltios. Si bien, este balastro es analógico, podemos fácilmente convertirlo en digital al agregarle al diseño un microcontrolador que realice la interfase entre el bus digital y la señal analógica que requiere dispositivo, de esta manera, obtenemos finalmente el balastro digital

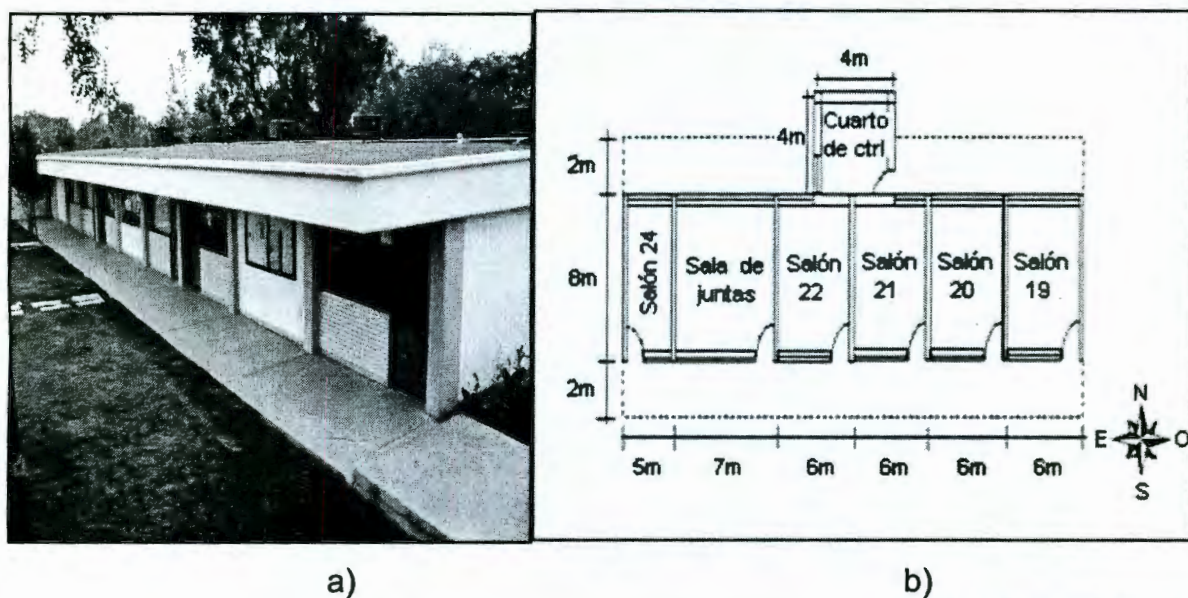
que estábamos buscando, un dispositivo capaz de comunicarse con un bus digital, y almacenar información en la memoria del microcontrolador incrustado, así como también, gracias al diseño, es posible que el MCU, monitoree el estado de la luminaria, y darse cuenta cuando ha ocurrido un fallo en el balastro e informar al resto de la red.

3. DESARROLLO DEL SISTEMA

Antes de iniciar con la etapa de diseño, debemos considerar las características del edificio donde vamos a instalar el sistema de iluminación automático.

3.1. Características del edificio

El sujeto sometido a experimentación, es el edificio de clases del postgrado de la Facultad de Ingeniería en la UAQ, el cual tal y como se aprecia en la Figura 7, es un edificio de un solo nivel, el cual cuenta con 4 salones que tienen un área cubierta de 48 m², una sala de juntas con una área cubierta de 56 m², un salón de juntas para profesores de 40 m² y un cuarto de control de 16 m², con una altura correspondiente de 3 m. (Fig. 3 a y b).



Fuente: Mario Trejo Perea, UAQ

Figura 7.- a) Edificio sujeto a experimentación. b) Vista de planta del edificio.

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 (Ghisi 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 los salones del edificio son similares, razón por la cual, será aproximadamente igual la cantidad de luz de día que pueda permear a cada uno de los salones).

Otra característica importante a considerar, es que dentro del edificio sujeto a experimentación, existe una sala de juntas, en donde se llevan a cabo presentaciones audiovisuales, razón por la cual, las necesidades en los niveles de iluminación requeridas en esta sala serán distintas, esta característica obliga a que el sistema a implementar sea flexible y se adecue a las diversas necesidades de iluminación del edificio.

El edificio cuenta con un sistema de monitoreo de la calidad de la energía eléctrica llamado MonitoUAQ, el cual se encuentra instalado en el cuarto de control. Dicho sistema nos permite monitorear los consumos energéticos de los salones en estudio a lo largo de todo un día, así como también monitorear la calidad de la energía, la ventaja del sistema MonitoUAQ es la de poder monitorear la energía eléctrica a diferentes periodos de muestreo, para este proyecto el período de muestreo se fijo en 5 minutos (Trejo et al., 2005).

3.2. Características del sistema de iluminación

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

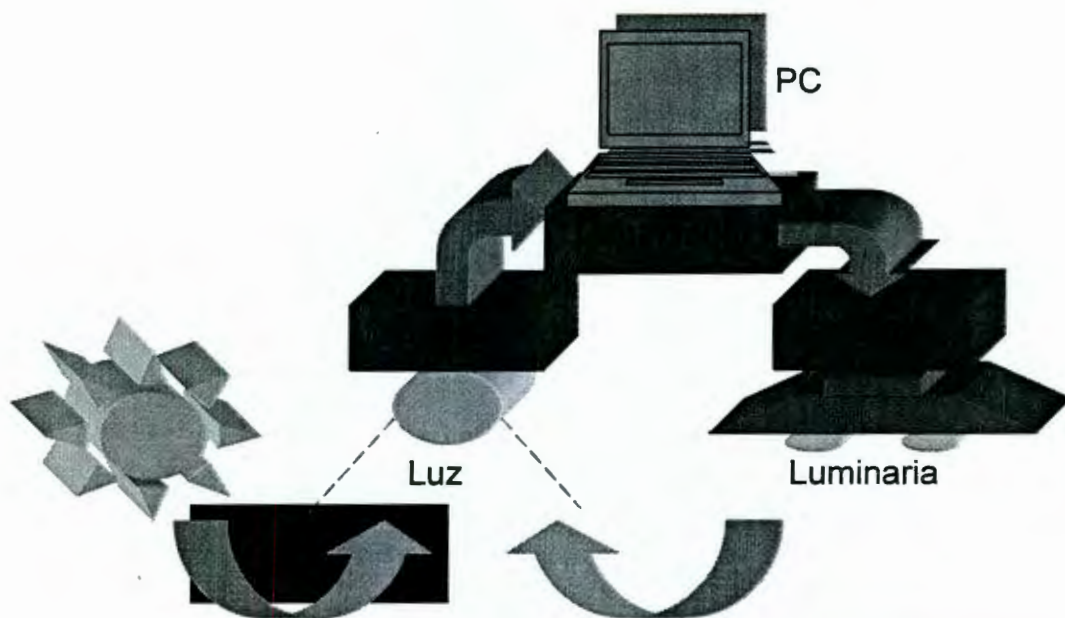
8, como podemos ver, al inicio a las 6:00am, cuando no hay suficiente luz natural, el sistema compensa esto encendiendo a su máxima capacidad las luminarias, en el transcurso de la mañana, a medida que aumenta la cantidad de luz natural, las luminarias del sistema disminuyen la iluminación provista de forma tal que se asegure siempre un nivel mínimo de luz al interior del edificio.



Fuente: Douglas Paton, consultor independiente

Figura 8.- Compensación de la luz natural por la luz artificial.

En la Figura 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. 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.



Fuente: Douglas Paton, consultor independiente

Figura 9.- Componentes del sistema de control de iluminación regulable automático

3.3. Red propuesta

De acuerdo a lo ya revisado hasta el momento, creemos que el protocolo que debemos utilizar al implementar nuestra red de balastros es el DALI, esto debido a la gran aceptación que ha tenido el mismo entre los fabricantes de esta clase de dispositivos, además con ello, aseguramos la interoperatividad de nuestro sistema con balastros de distintos fabricantes.

Por el momento, se propone instalar el sistema en un sólo edificio de salones, para seguir evaluándolo, para ello suficiente el construir la red que se muestra en la siguiente Figura 10.

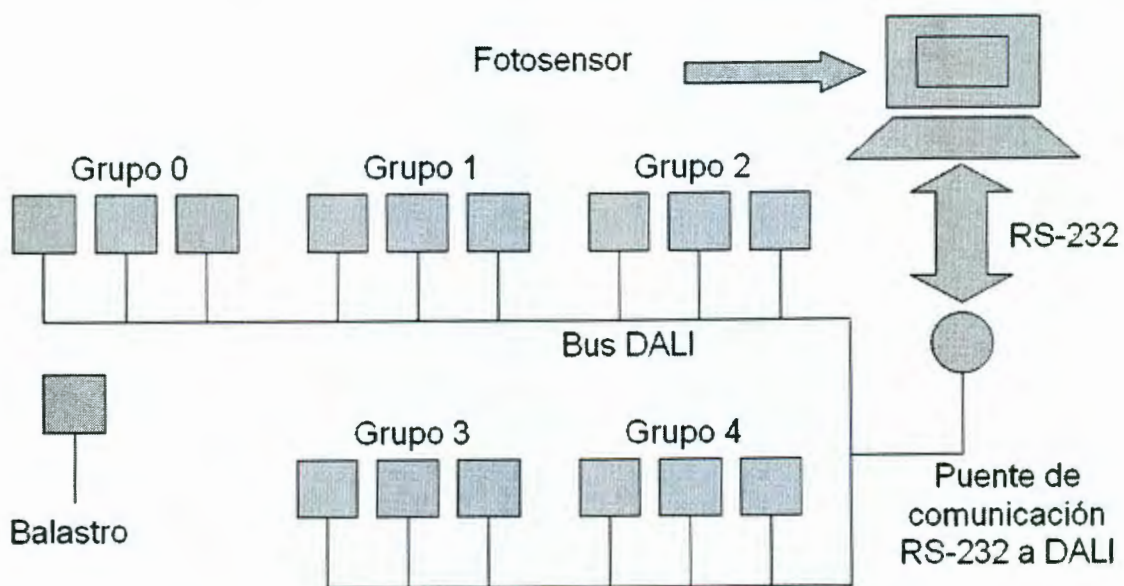


Figura 10.- Topología de la red a implementar

Como podemos observar, los balastos de la red se encuentran ordenados por grupos, gracias al protocolo empleado, nos es posible direccionar las señales de control a los diferentes grupos de manera independiente, con lo cual, podemos controlar de manera individual la iluminación presente en cada uno de los salones.

Al seguir esta topología de red, en un momento dado que fallara algún balastro, no alteraría el funcionamiento del resto de la red, además en el momento en que deseemos extender el sistema al resto de los edificios en la Facultad de Ingeniería en la UAQ, basta con instalar este mismo tipo de red, e interconectarlas entre sí por otra red de mayor alcance, como lo puede ser una red con un protocolo de comunicación RS-485, ó gracias al uso de la computadora, será posible incluso comunicar los sistemas instalados en los edificios por medio de Internet

3.4. Dispositivos propuestos

Los balastros digitales propuestos en un inicio, fue el diseño de referencia del que se hizo mención en la sección 2.6 del presente trabajo, sin embargo pese a que se siguió aparentemente de manera correcta el proceso de diseño, tuvimos problemas al construir un dispositivo de estos. Como el objetivo del presente trabajo no es el diseño y construcción de balastros digitales, se optó por utilizar balastros analógicos y realizar la interfaz digital, esto debido al elevado costo de los balastros digitales, en la Figura 11 se aprecia un diagrama a bloques con los dispositivos propuestos.

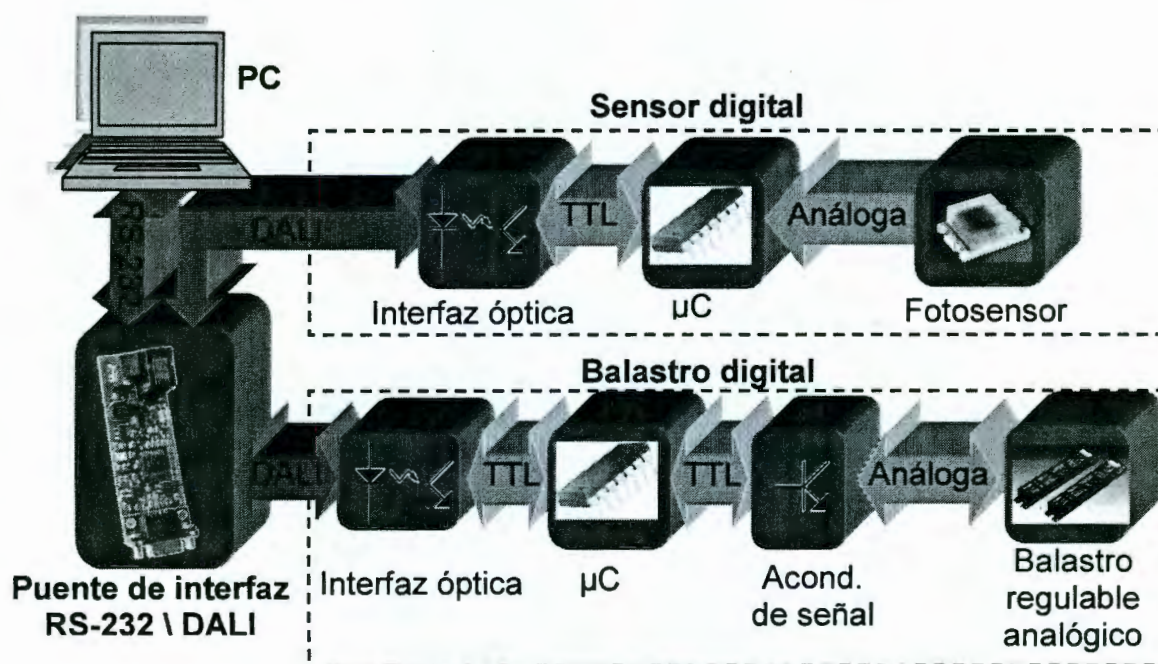


Figura 11.- Diagrama a bloques del sensor y balastro digital

3.5. Monitoreo de los consumos de energía

En el cuarto de control ubicado a un costado de los salones de clases, se encuentra el panel de contactos eléctrico que suministran de energía al sistema de

iluminación, es aquí donde se puede instalar un instrumento para realizar un monitoreo en los consumos de energía, tal y como se muestra en la Figura 12.

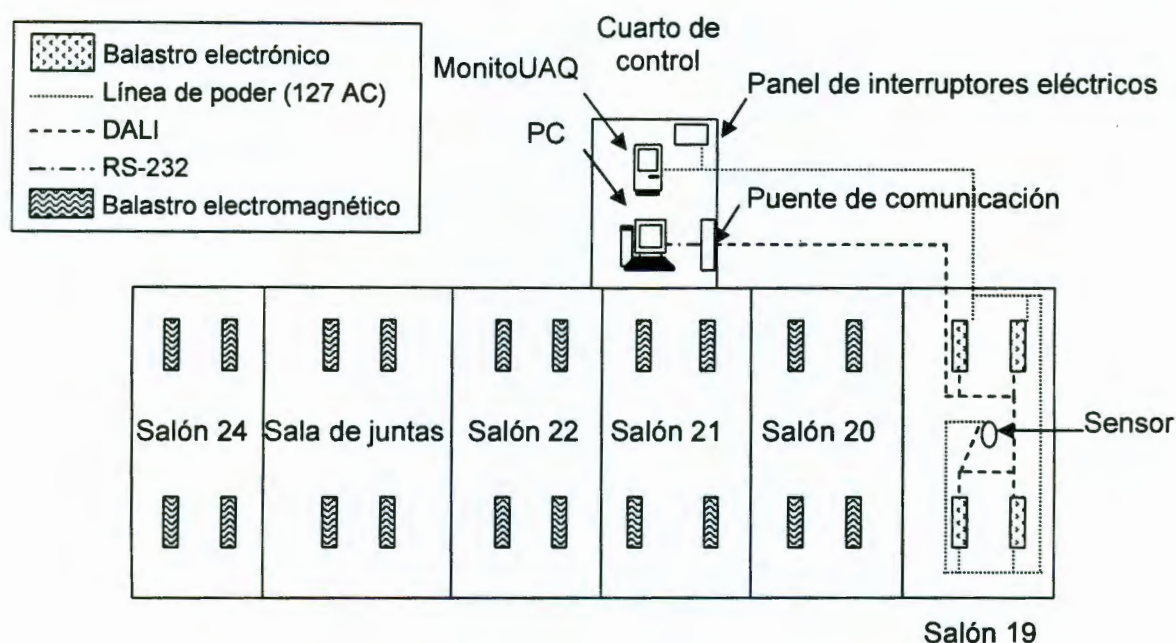


Figura 12.- Sistema propuesto para evaluar el ahorro energético

3.6. Puente de comunicación RS-232/DALI

Microchip Technology Inc., viendo el emergente estándar europeo de comunicación para balastros regulables, y tomando en cuenta la creciente presencia que tomaban en el mercado estos dispositivos, en el 2002 muestra una aplicación (AN811), la cual es precisamente una puerta de enlace entre los protocolos de comunicación RS-232/DALI. Dicha aplicación, es una alternativa muy simple para realizar un enlace entre un protocolo ya muy establecido y conocido (RS-232), con el emergente estándar DALI, lo cual es de gran ayuda para los diseñadores ya que no es necesario invertir mucho tiempo en crear este tipo de enlaces, además de que es una alternativa de bajo costo.

Además, al utilizar el puerto RS-232 de la PC, estamos utilizando de manera implícita la protección eléctrica que tiene la computadora en este puerto, con esto prevenimos daños en la PC en caso de una descarga eléctrica en el sistema.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para implementar un sistema de iluminación que aproveche la luz natural, de manera experimental se montaron los cuatro balastos analógicos de intensidad regulable (necesarios para las luminarias de un salón), así como también se instaló un fotosensor (elemento fotorresistivo), necesario para medir el nivel de iluminación presente al interior del salón.

Por otro lado, si bien es cierto, el presente no es el primer esfuerzo por lograr un ahorro energético en la Facultad de Ingeniería de la UAQ, de acuerdo a M. Trejo Perea (datos no publicados) se han implementado alternativas para ahorrar energía eléctrica en los salones de clases de dicha institución, esto mediante el reemplazo de los actuales balastos y luminarias (balastos magnéticos, lámparas fluorescentes T12), por unos con una mayor eficiencia energética (balastos electrónicos de intensidad no regulable, lámparas fluorescentes T8), y además mediante la implementación de un control de iluminación denominado "control horario" (del cual se hablara más adelante en el presente capítulo). Es por esta razón, que en las pruebas del presente trabajo se decidió comparar el consumo energético registrado por un salón de clases durante tres días completos. A lo largo del primer día de monitoreo, el salón en estudio opero en condiciones normales, es decir, los usuarios tienen el control de encendido-apagado de las luminarias. En el día dos, el salón operó bajo el sistema denominado control horario (M. Trejo Perea, datos sin publicar). Y finalmente, durante el tercer día de estudio, el salón opero con el sistema propuesto en el presente trabajo, es decir, se reguló la intensidad de las luminarias en función de la cantidad de luz presente al interior del salón de clases.

A continuación se detalla un poco más las pruebas realizadas, así como también, los resultados encontrados.

4.1. Monitoreando los niveles de iluminación

Para monitorear la cantidad de luz presente al interior del salón (debida tanto a la luz natural proveniente del exterior, como a la luz artificial provista por las luminarias fluorescentes), el sensor de iluminación (un elemento foto-resistivo) fue instalado en el centro del salón tal y como se muestra en la Figura 13.

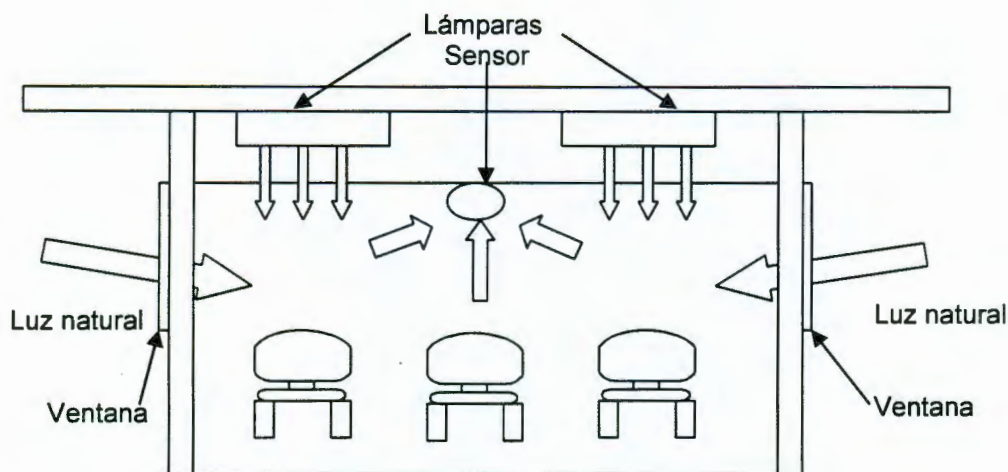


Figura 13.- Disposición física del fotosensor así como distribución prevista de la luz

De esta manera, se pretende obtener una lectura que nos refleje la mezcla de luz natural con la iluminación artificial presentes al interior del salón.

4.2. Cuantificando el ahorro energético

Para cuantificar el ahorro energético, se realizaron una serie de monitoreos del consumo energético en un salón de clases durante tres días completos, esto bajo distintas condiciones de operación en la activación de las luminarias, dichos consumos los definimos como sigue:

- a) Consumo en operación convencional: Se realizaron mediciones del consumo de energía eléctrica 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 ó debido a que el salón se encuentra desocupado, lo cual representa un gasto innecesario debido a condiciones de operación ineficientes.
- b) Consumo con control horario (encendido-apagado automático): En este caso, se realiza un corte en el suministro energético de acuerdo a un criterio de 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.
- c) Consumo con control de intensidad regulable automático: En este caso además de realizarse un encendido-apagado automático del suministro energético, los balastos son operados de tal manera en que puedan suministrar el porcentaje de iluminación necesario para mantener las condiciones de iluminación y confort óptimas.

4.2.1. Consumo con operación convencional

En la siguiente gráfica podemos apreciar el consumo registrado a lo largo de un día normal de clases poniendo a trabajar el sistema bajo operación convencional, es decir, en este modo de operación, los usuarios del salón tienen un control encendido-apagado de las luminarias

Como podemos observar (ver Figura 14), existe un desperdicio considerable de energía eléctrica, esto al permanecer activadas las luminarias en horarios donde la cantidad de luz natural presente en el salón normalmente no requiere que las lámparas se encuentren encendidas.

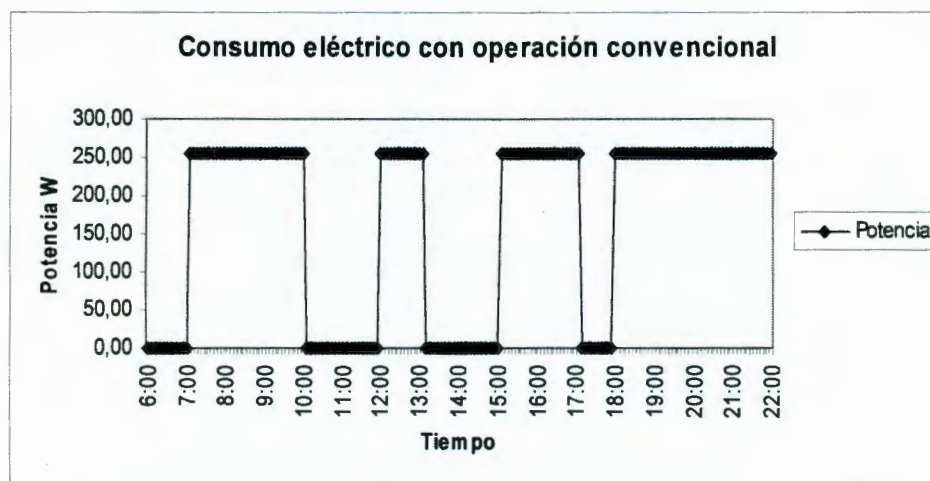


Figura 14.- Consumo eléctrico con operación convencional

Como podemos ver en la gráfica anterior, en pleno medio día se encontraron encendidas las luminarias del salón, cuando normalmente en este horario la cantidad de luz natural que entra al edificio es suficiente para no requerir activar la iluminación artificial del edificio, lo cual nos habla de la existencia de un desperdicio de energía eléctrica debido a un mal uso de las luminarias.

4.2.2. Consumo con control horario

En la siguiente gráfica (ver Figura 15) se muestra el consumo de energía eléctrica registrado cuando el sistema se puso a trabajar con un control horario, como se puede ver con este simple control se hace un consumo racional de energía eléctrica ya que se eliminan los desperdicios presentados en el consumo anterior debidos a un mal uso de las luminarias.

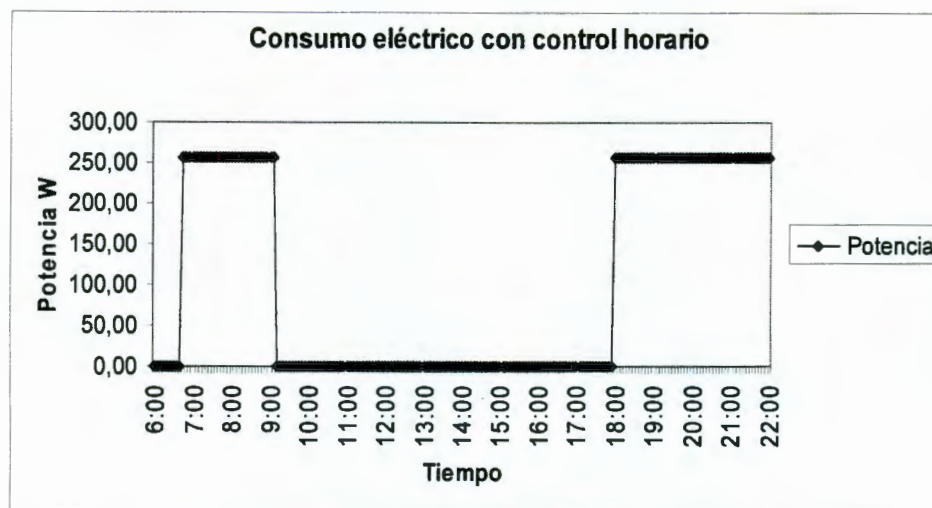


Figura 15.- Consumo eléctrico con control horario

Dadas las características del edificio (ventanas amplias que permiten el paso de la luz natural presente en el exterior del edificio), así como a su ubicación geográfica (prácticamente todos los días del año son soleados), resulta suficiente conocer la hora del día para asegurar que hay luz natural en el interior del salón suficiente, como para asegurar que no son requeridas las luminarias artificiales del mismo. Es por esta razón, que nos permitimos restringir el uso de las lámparas en cierto horario del día.

4.2.3. Consumo con control de intensidad regulable automático

Finalmente, la siguiente gráfica (ver Figura 16) muestra el consumo de energía registrado por el sistema de control regulable automático en un día normal de clases, como podemos ver, es notorio ver que el ahorro logrado es superior al visto con el control horario.

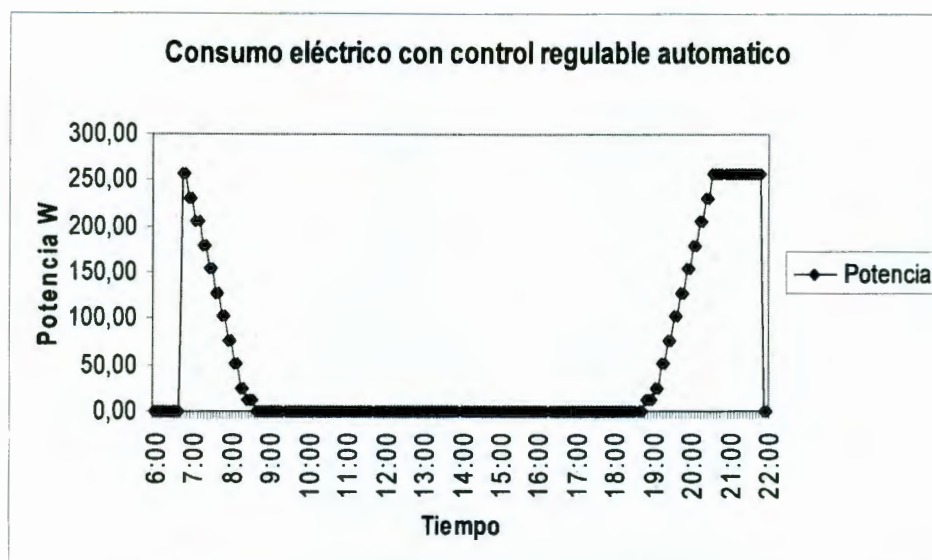


Figura 16.- Consumo eléctrico con control de intensidad regulable automático.

El ahorro es logrado gracias a regular de manera dinámica la intensidad de las luminarias, esto en función de la cantidad de luz presente al interior del salón, con ello aprovechamos al máximo la iluminación natural que proviene del exterior del edificio (la cual nos es gratuita).

4.3. Comparando resultados obtenidos

El consumo energético del sistema operando bajo el denominado control horario, fue considerado como referencia para evaluar el ahorro logrado por el sistema que en el presente trabajo se propone, esto debido a que es considerado como un uso racional de la electricidad (al evitar un mal uso de la energía eléctrica por parte de los usuarios del edificio), además de que dicho sistema, actualmente se encuentra en operación y bajo estudio.

La siguiente tabla (ver cuadro VII) muestra una comparación entre los resultados obtenidos en los tres sistemas sometidos a estudio, como se aprecia, con el control regulable automático obtuvo la mayor eficiencia energética, al

aprovechar de manera dinámica la cantidad de luz natural presente al interior de los salones de clases

Cuadro VII.- Comparación de resultados obtenidos.

Sistema de iluminación	Consumo en KWh	Consumo en %	Ahorro en %
Convencional	2.592	157	-57
Control horario	1.653	100	0
Control de intensidad regulable automático	0.774	47	53

Otra cosa que es notoria en los resultados, es el desperdicio de energía debido al mal uso de las luminarias, como podemos ver, este desperdicio es superior al 50%.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Se observó que al restringir el control a los usuarios, evitamos los desperdicios energéticos que estos generan al hacer un mal uso de las lámparas. Las pruebas preliminares del sistema de control automático de iluminación ha dado buenos resultados, con ahorros potenciales mayores al 50% del total del consumo de energía eléctrica en cuanto a iluminación se refiere, esto sin la necesidad de utilizar un control una técnica de control tan sofisticado como lo pudiera ser un controlador inteligente por ejemplo, además cabe resaltar que el ahorro logrado en ningún momento comprometió el confort de los usuarios. Por otra parte, el sistema de control automático de iluminación propuesto nos permite extenderlo fácilmente al resto del edificio e inclusive al resto de la Facultad de Ingeniería en la UAQ, además de que cumplimos con un estándar internacional de comunicación para los balastros, lo cual asegura la interoperabilidad de los balastros utilizados con otros de distintos fabricantes existentes en el mercado.

La información presentada en este trabajo servirá como complemento para una estrategia de control inteligente en todo el edificio de posgrado, donde en base al control automático del sistema de iluminación se reduzca más del 50% el consumo de energía eléctrica debido a iluminación. Además, se podrán diseñar los balastros regulables que empleemos en el sistema de control de iluminación, basándonos en la técnica de diseño aquí mencionada, con la finalidad de abaratar aun más los costos del sistema en el sistema de iluminación, dado que los balastros digitales disponibles en el mercado son relativamente costosos aún.

6. Referencias

- Asada H. y Shukura M., 1999, Numerical analysis of annual exergy consumption for daylighting, electric-lighting, and space heating/cooling system, 6th International IBPSA Conference, Kyoto, Japón.
- Di Stefano J., 2000, Energy efficiency and the environment: the potential for energy efficient lighting to save energy and reduce dioxide emissions at Melbourne University, Australia, Energy 25 (823-839).
- Fernández de Torres R. y Remacha Vallejo M., 2004, Luz y salud: la respuesta inteligente mediante el alumbrado artificial. XXX Simposium nacional de iluminación Roquetas del mar.
- Ghisi E. y Tinker J., 2005, An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings, Building and environment, 40: (51-61).
- Harrison A. y Loe E., Read J., 1998, Intelligent Buildings in South East Asia, E & FN SPON, London.
- Koch E. y Rubinstein F., 2005, Evaluation of Alternative Field Buses for Lighting Control Applications, Broaddata Communications Torrence, CA.
- Kolokotsa D. Niachou K. Geros V. Kalaitzakis K. Stavrakakis G.S. y Santamouris M., 2005, Implementation of an integrated indoor environment and energy management system, Energy and buildings 37: (93-97).
- Lee E.S. y Selkowitz, 2006, The New York Times Headquarters daylighting mockup: Monitored performance of the daylighting control system, Energy and Buildings 38: (914-929).
- Martinot E. y Borg N., 1998, Energy-efficiency programs: Experience and lessons from eight countries, Energy policy, Vol. 26, No. 14, pp 1071 – 1081.
- Melhorn C.J., Scwabe R.J. y Samotyj M., 1995, Effect of efficiency lighting on power quality in public buildings, IEEE, (2069 – 2075).
- Microchip Inc., 2002, The RS-232/DALI bridge interface, AN811, www.microchip.com.
- Mills E. y Orlando E., 2002, Why we're here: The \$230-billion global lighting energy Hill, Proceedings of the 5th International Conference on Energy-Efficient Lighting, Nice, France.

- Ribarich T. y Contenti C., 2002, Analog and digital fluorescent lighting systems, Technical Paper, International Rectifier.
- Ribarich T. y Ribarich J., 1998, A New Control Method for Dimable High Frequency Electronic Ballast, In: IEEE-IAS Conf. Rec., 2038-2043.
- Syed Fadzil S. F. y Sheau-Jiunn S., 2004, Sunlight control and day light distribution analysis: The KOMTAR case study, Building and Environment, 39: (713 – 717).
- Trejo Perea M. Ríos Moreno G.J. Rivas E. y Rauch V, 2005, Savings and analysis of the consumption and quality of the energy, 1st International Congress of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro, México, 253–261.
- United States Environmental Protection Agency, 2004, ENERGY STAR® Building Upgrade Manual.
- Vela J. A., Barrientos A. y Caballero J. L., 2006, Se dispara con Fox electricidad cara, Reforma.

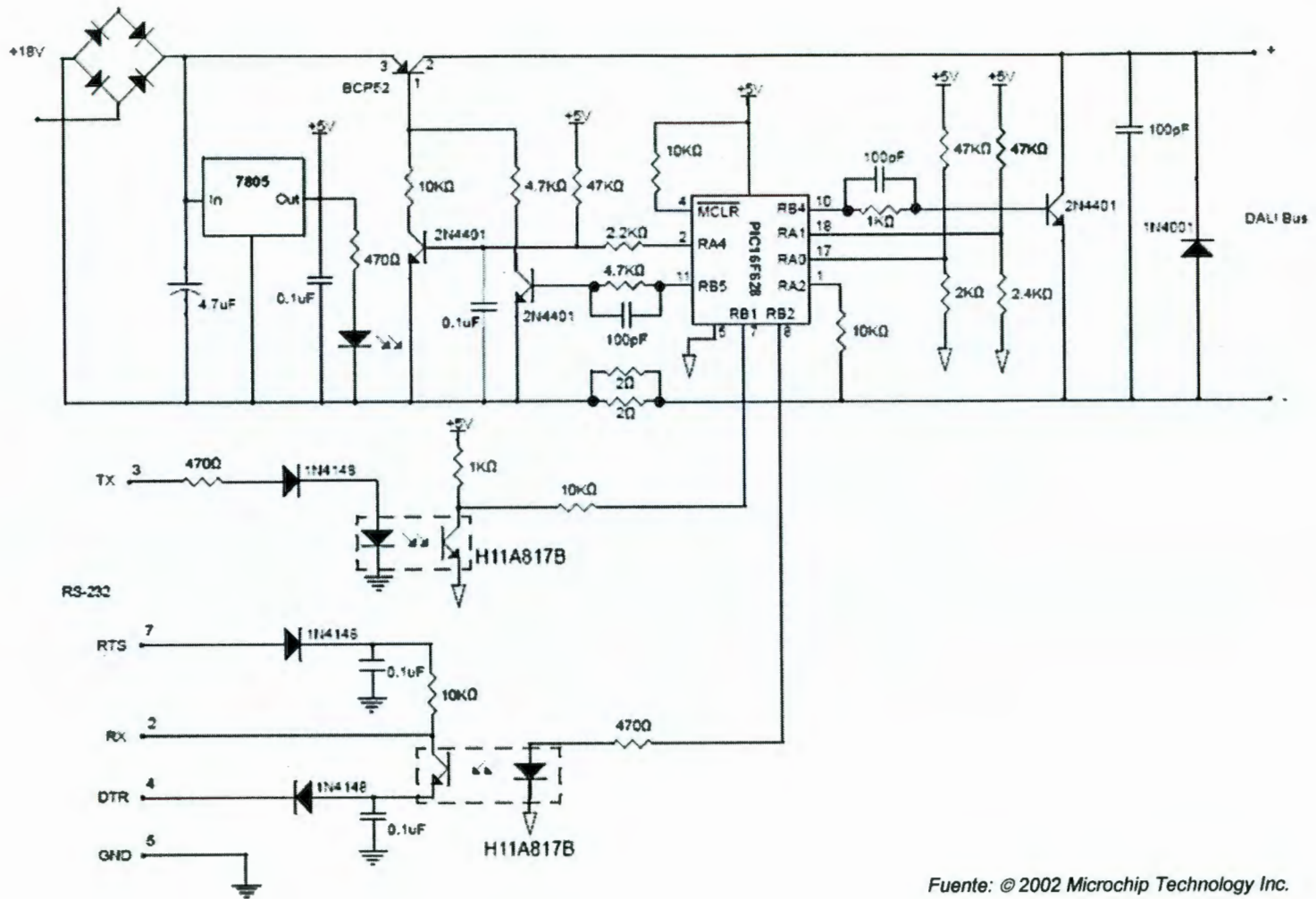
7. Apéndice

A.1. Comandos del puente de enlace RS-232/DALI

Comando	Función	Dato1	Dato2
0	Reinicia el puente	NA	NA
1	Regresa el estado del puente. Bit 1 = Error de recepción. Bit 2 = Sobrecarga de Bus DALI	NA	NA
8	Almacena la primera secuencia de 16 bits DALI (Comando19)	DALI MSB	DALI LSB
9	Almacena la segunda secuencia de 16 bits DALI (Comando19)	DALI MSB	DALI LSB
10	Almacena la tercera secuencia de 16 bits DALI (Comando19)	DALI MSB	DALI LSB
16	Envío, envía secuencia de 16 bits DALI	DALI MSB	DALI LSB
17	Doble Envío, envía la secuencia DALI de 16 bits dos veces con 10 ms de separación	DALI MSB	DALI LSB
18	Envía y Recibe, envía secuencia DALI de 16 bits y espera a lo mas 100 ms por 8 bits de regreso	DALI MSB	DALI LSB
19	Envía la secuencia de tres palabras de los comandos 8, 9 y 10	NA	NA
192	Cambia el retardo de borde del transmisor DALI (us)	DATA_H	DATA_L
193	Cambia el retardo de paro del transmisor DALI (us)	DATA_H	DATA_L
194	Cambia el retardo regulador del puente DALI	DATA_H	DATA_L
195	Cambia el tiempo de espera del receptor DALI (ms) (Comando 18)	NA	DATA_L
196	Cambia el retardo de inicio del receptor DALI	DATA_H	DATA_L
197	Cambia el retardo de muestreo del receptor DALI	DATA_H	DATA_L
198	Cambia el retardo final de muestreo del receptor DALI	DATA_H	DATA_L
199	Habilita la depuración	NA	DATA_L
200	Cambia el retardo de doble envío DALI (ms) (Comando 17)	NA	DATA_L
201	Cambia el retardo de secuencia DALI (ms) (Comando 19)	NA	DATA_L
208	Pregunta por los bits mas significativos del retardo de borde del transmisor DALI	NA	NA
209	Pregunta por los bits menos significativos del retardo de borde del transmisor DALI	NA	NA
210	Pregunta por los bits mas significativos del retardo de paro del transmisor DALI	NA	NA
211	Pregunta por los bits menos significativos del retardo de paro del transmisor DALI	NA	NA
212	Pregunta por los bits mas significativos del retardo regulador del puente DALI	NA	NA
213	Pregunta por los bits menos significativos del retardo regulador del puente DALI	NA	NA
214	Pregunta por el tiempo de espera del receptor DALI	NA	NA
215	Pregunta por los bits mas significativos del retardo de inicio del receptor DALI	NA	NA
216	Pregunta por los bits menos significativos del retardo de inicio del receptor DALI	NA	NA
217	Pregunta por los bits mas significativos del retardo de muestreo del receptor DALI	NA	NA
218	Pregunta por los bits menos significativos del retardo de muestreo del receptor DALI	NA	NA
219	Pregunta por los bits mas significativos del retardo final de muestreo del receptor DALI	NA	NA
220	Pregunta por los bits menos significativos del retardo final de muestreo del receptor DALI	NA	NA
221	Pregunta por la depuración	NA	NA
222	Pregunta por el retardo de doble envío DALI	NA	NA
223	Pregunta por el retardo de secuencia DALI	NA	NA

Fuente: © 2002 Microchip Technology Inc.

A.2. Circuito del puente de enlace



Fuente: © 2002 Microchip Technology Inc.

A.3. Eficiencias de balastos regulables de hoy en día

Fabricante	Nombre registrado	Número de catálogo del fabricante (120/277)	Tipo de regulado de intensidad	Número de lámparas	Voltaje	FP	Watts de entrada	Factor de Eficacia del Balastro (FEB)	Eficiencia Relativa del Sistema (ESR)
Balastos de 1 lámpara									
Osram – Sylvania	Quicktronic Helios	QTP 1x32T8/(120/277) DIM5-B	A	1	120/227	0.94	32	2.94	0.940
Sylvania	Powersense	QTP 1x32T8/UNIV DIM	H	1	120/227	0.88	30	2.93	0.939
Advance Transformer	Mark X	REZ-132-SC/VEZ-132-SC	P	1	120/227	1.00	35	2.86	0.914
Advance Transformer	Mark 7	IZT-132-SC	D	1	120/227	1.00	36	2.78	0.889
Advance Transformer	ROVR	IDA-132-SC	D	1	120/227	1.00	36	2.78	0.889
Osram – Sylvania	Quicktronic Professional T* DALI	QTP 1x32T8/(120/277) UNIV DALI	D	1	120/227	1.00	36	2.78	0.889
Universal Lighting Technologies	DaliPRO	B132PUNDV1	D	1	120/227	1.00	37	2.7	0.865
Universal Lighting Technologies	AddressPro	ES58-27B/25K	D	1	120/227	0.87	34	2.56	0.819
Universal Lighting Technologies	SuperDim	ES5821B	Z	1	120/227	0.87	34	2.56	0.816
Balastos de 2 lámparas									
Axis Technology	DH&D	AX232B 120/277	Z	2	120/227	0.99	64	1.55	0.990
Advance Transformer	Mark 7	IZT-2S32-SC	D	2	120/227	1.00	68	1.47	0.941
Advance Transformer	ROVR	IDA-2S32-SC	D	2	120/227	1.00	68	1.47	0.941
Advance Transformer	Mark X	REZ-2S32-8C/VEZ-2S32-SC	P	2	120/227	1.00	68	1.47	0.941
Sylvania	Powersense	QTP 2x32T8/UNV DIM	H	2	120/227	0.88	60	1.47	0.939
Osram – Sylvania	Quicktronic Helios	QTP 2x32T8/(120/277) DIM5-B	A	2	120/227	0.94	66	1.42	0.912
Osram – Sylvania	Quicktronic Professional T* DALI	QTP 2x32T8/(120/277) UNV DALI	D	2	120/227	1.00	72	1.39	0.889
Universal Lighting Technologies	DaliPRO	B232PUNDV1	D	2	120/227	1.00	73	1.37	0.877
Universal Lighting Technologies	AddressPro	ES58-28B/26K	D	2	120/227	0.87	65	1.34	0.857
Universal Lighting Technologies	SuperDim	ES5822B	Z	2	120/227	0.87	65	1.34	0.857
Lutron	Eco – 10 10%	ECO-T832-120-2-L/T	Z	2	120	0.85	66	1.29	0.824
Balastos de 3 lámparas									
Advance Transformer	ROVR	IDA-3S32-SC	D	3	120/227	1.00	93	1.08	1.032
Sylvania	Powersense	QTP 3x32T8/UNV DIM	H	3	120/227	0.88	87	1.01	0.971
Advance Transformer	Mark X	REZ-3S32-8C/VEZ-3S32-SC	P	3	120/227	1.00	102	0.98	0.941
Osram – Sylvania	Quicktronic Helios	QTP 3x32T8/(120/277) DIM5-Q	A	3	120/227	0.88	93	0.95	0.908
Advance Transformer	Mark 7	IZT-3S32S-SC	Z	3	120/227	0.88	93	0.95	0.908
Lutron	Eco – 10 10%	TVE-T832-120-3	D	3	120	0.85	96	0.89	0.850
Balastos de 4 lámparas									
Advance Transformer	Mark 7	IZT-4S32	D	4	120/227	0.88	116	0.76	0.971
Advance Transformer	ROVR	IDA-4S32	D	4	120/227	0.88	116	0.76	0.971
Sylvania	Powersense	QTP 4X32T8/UNV DIM	H	4	120/227	0.88	117	0.75	0.963
Osram – Sylvania	Quicktronic Helios	QTP 4X32T8/(120/277) DIM 10-Q	A	4	120/227	0.88	120	0.73	0.939

Fuente: Francis Rubinstein, LBNL (Lawrence Berkeley Nacional Laboratory)

8. Anexos

Anexo 1. Carta de aceptación del artículo enviado al 3er Congreso Internacional de Ingeniería



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Centro Universitario
Cerro de las Campanas
Santiago de Querétaro
Qro., México C.P. 76010
Tel. 01(442)192 12 00
Exts. Fax.

R. Luna-Rubio,
G.J. Ríos-Moreno,
M. Trejo-Perea,
S.E. Cervantes-Perez,
E. A. Rivas-Araiza y
S. Zavaleta-Guerrero.
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro

Nos complace informarle que su artículo titulado "**Sistema de control automático de iluminación para lámparas fluorescente**" ha sido aceptado, con base en la revisión realizada por el Comité Técnico del Tercer Congreso Internacional de Ingeniería, a celebrarse del 23 al 25 de abril del 2007, en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

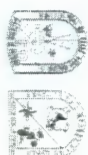
Así mismo, le informo que contará con 15 minutos para su presentación, rogándole de la manera más atenta se ajuste al tiempo asignado considerando el gran número de ponencias que participan.

Esperamos contar con su valiosa presencia en el evento y aprovechamos para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Comité Organizador

Vianey Torres Argüelles
Coordinadora Académica

Anexo 2. Reconocimiento obtenido en el 3er 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 como

Ponente con el artículo

Sistema de control automático de iluminación para
lámparas fluorescentes.

en el 3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA

Ricardo Luna Rubio
Ricardo Luna Rubio
Ingeniero en Electrónica
Facultad de Ingeniería



3er CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA

Anexo 3. Artículo publicado en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería

Sistema de control automático de iluminación para lámparas fluorescente Lighting automatic control system for fluorescent lamps

R. Luna-Rubio¹, G.J. Ríos-Moreno¹, M. Trejo-Perea¹, S.E. Cervantes-Perez¹.

E. A. Rivas-Araiza¹, S. Zavaleta-Guerrero¹.

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

Correo electrónico: luna_leviatan@hotmail.com, rios@uaq.mx, mtp@uaq.mx,
sergio@uaq.mx, erivas@uaq.mx, zaval@uaq.mx.

RESUMEN. Con el presente trabajo se pretende ofrecer una alternativa de ahorro de energía eléctrica en los salones de clases de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, U.A.Q., al implementar de manera experimental, un sistema de control automático de iluminación para lámparas fluorescentes, el cual, en función de la cantidad de luz de día presente en el interior de los salones, entregue un nivel de iluminación suficiente para realizar de manera mas eficaz las actividades al interior de los mismos. Se compararon tres sistemas de iluminación, un sistema con una operación convencional, un sistema con un control horario (encendido-apagado automático) y un sistema con control regulable automático. Tomado como referencia el sistema con el control horario, los resultados obtenidos mostraron que con el sistema de control automático regulable además de eliminar el desperdicio, es posible lograr un ahorro en el consumo de energía eléctrica superior al 50%. Dicho sistema podrá servir como plataforma para ser implementado en el resto de la Facultad de Ingeniería.

Palabras clave: Ahorro de energía eléctrica, control automático, lámparas fluorescentes, confort.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día con los llamados edificios inteligentes se ha buscado ofrecer un mayor confort a los usuarios, dichas comodidades en ocasiones son obtenidas mediante la creación de ambientes artificiales, con los cuales además del confort, se busca un ahorro energético al aprovechar la energía gratuita que nos ofrece el medio ambiente (Harrison et al., 1998). En los sistemas de iluminación por ejemplo, es posible aprovechar la luz natural que entra al edificio a través de las ventanas, y en función de esto, regular la cantidad de luz que entregan las luminarias, de tal forma que se cumplan las necesidades de iluminación requeridas al interior del edificio, de esta forma, cumplimos con los dos objetivos, lograr un incremento en el confort en los usuarios, y al mismo tiempo obtener un ahorro potencial en el consumo de energía eléctrica.

Para cuantificar el ahorro de consumo de energía eléctrica (Kolokotsa et al., 2005), implementa un ambiente artificial al interior de dos edificios con ubicaciones geográficas y condiciones climáticas naturales distintas. Por medio de un controlador difuso regulaba el sistema de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (HVAC, acrónimo en inglés de *Heating, Ventilating, and Air Conditioning*) e iluminación. El sistema de control aprovechaba la energía que el medio ambiente aportaba al interior del edificio. El desarrollo del sistema redujo considerablemente el consumo de energía eléctrica, satisfaciendo los requerimientos de confort térmico para los ocupantes; de los sistemas sometidos a experimentación (HVAC e iluminación), el mayor ahorro de energía eléctrica fue encontrado en el sistema de iluminación.

Estudios recientes han demostrado que al crear ambientes artificiales de iluminación, además de los beneficios de ahorros potenciales en el consumo de la energía eléctrica, de acuerdo a estudios biomédicos de los últimos 50 años, es posible influir directamente en el estado de ánimo, estado de alerta y salud de las personas (Fernández et al., 2000). De esta manera, además de mejorar el confort de los usuarios, se pueden prevenir accidentes al influir en el estado de alerta de las personas, es decir, si una persona se encuentra realizando alguna actividad que represente cierto riesgo, como lo puede ser el operar cierta maquinaria, si logramos que la persona este alerta, disminuimos la posibilidad de que exista accidente alguno.

Los edificios públicos, oficinas, e industrias, usan en su mayoría luminarias fluorescentes; son populares debido a la buena relación que tienen entre la potencia consumida y la cantidad de iluminación que nos ofrecen.

Tomando en cuenta lo anterior, en la búsqueda de un mayor ahorro de energía eléctrica, se ha puesto especial interés en el desarrollo de balastos electrónicos, con los cuales, además de buscar una mayor eficiencia energética que la presentada por sus antecesores los balastos electromagnéticos, se busca precisamente regular la potencia luminosa que entreguen las luminarias fluorescentes. Se han dedicado años de estudio, para facilitar el diseño y construcción de balastos electrónicos de potencia de salida ajustable (es decir, balastos que nos permitan ajustar el nivel de luz que entregan estas lámparas), con la finalidad de brindar nuevas técnicas de diseño para esta clase de dispositivos (Ribarich et al. 1998), muestran una novedosa técnica para el diseño y construcción de balastos electrónicos ajustables, dicha técnica se basa en el uso de un circuito integrado de aplicación específica ASIC, (*Application Specific Integrated Circuit*) de Internacional Rectifier, el cual simplemente dependiendo de la potencia máxima de la luminaria, hay que ajustar ciertos valores de resistencias y capacitores en el diseño.

El objetivo de este trabajo es implementar a manera experimental un sistema de control automático para lámparas fluorescentes, aprovechando al máximo la cantidad de luz exterior para poder brindar una iluminación adecuada a los ocupantes, logrando con esto una reducción potencial en el consumo de energía eléctrica debido al sistema de iluminación, y un incremento en el confort de los ocupantes.

El resto del artículo está organizado como sigue: en la sección 2 se muestran las consideraciones teóricas para la regulación de las lámparas fluorescentes. En la sección 3 se describen los materiales y métodos para el desarrollo del sistema. En la sección 4 se muestran los resultados de las pruebas del funcionamiento del sistema. Finalmente se presentan las conclusiones y los trabajos futuros en la sección 5.

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

2.1. Sistemas de regulación para luminarias fluorescentes.

En este tipo de sistemas, los balastos pueden recibir la señal de control protocolizadas mediante dos medios distintos, analógicos o digitales (Ribarich et al., 2002). Dependiendo de la aplicación, las características del edificio, y la cantidad de luminarias a controlar, puede ser más conveniente utilizar uno u otro método de control.

2.2. Balastos analógicos vs digitales.

Los sistemas de regulación para luminarias fluorescentes que emplean balastos analógicos, generalmente son empleados en lugares donde es necesario que varias luminarias reciban la misma señal de control y además es requerido que el acceso a este control se logre desde un solo punto, de tal forma que todas las luminarias quedan conectadas en paralelo como se muestra en la Fig. 1. Se puede observar que todas las lámparas de este sistema reciben la misma señal de control, la cual es proveniente desde un único punto que es donde se encuentra el controlador del sistema.

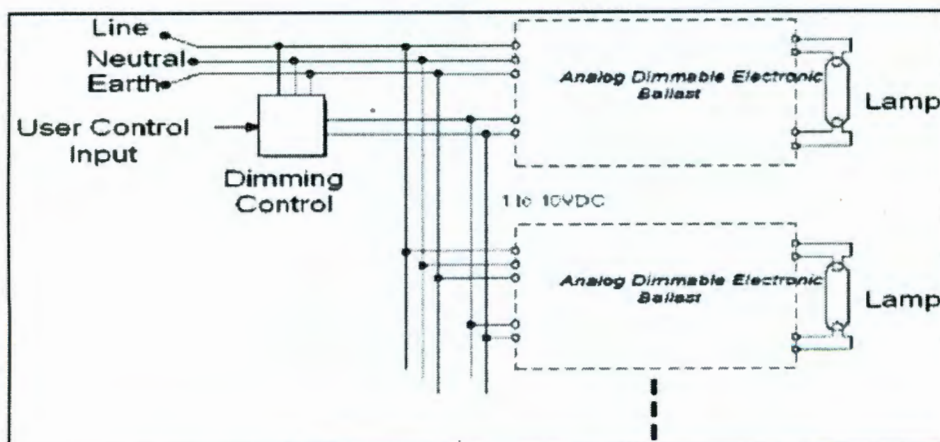


Figura 1. Sistema de iluminación basado en balastos analógicos.

Por otro lado, sistemas de iluminación que emplean balastos digitales forman redes de comunicación, es decir, podemos direccionar las acciones de control de manera individual para cada una de las luminarias conectadas a la red, además como es de esperarse, este tipo de sistemas permite acceder al control de iluminación desde varios puntos, así como también, asignar jerarquías a los puntos de control. Este tipo de sistemas es conveniente emplearlo cuando requerimos un control mas preciso en la iluminación.

En un principio, los sistemas de iluminación con balastos digitales empleaban diversos buses de campo industriales ya establecidos, pero buscando homogeneizar este tipo de sistemas, a mitad de la década de los 90's, en Europa inicio el desarrollo un protocolo de comunicación exclusivo para los dispositivos de iluminación, dicho protocolo es denominado DALI (*Digitally Addressable Lighting Interface*), el cual se puso a prueba de manera comercial en el año de 1998.

2.3. Protocolo de comunicación DALI

Pese a su reciente aparición, DALI ha sido rápidamente adoptado por los principales fabricantes europeos de balastos electrónicos, ya que es un estándar internacional de comunicación para este tipo de dispositivos. La topología de una red DALI es la de un bus, físicamente, la información viaja por dos cables, uno de los cuales es la señal de referencia y el otro posee la información digital, por lo que es empleada una comunicación maestro-esclavo half-duplex. En una misma red DALI es posible conectar hasta 64 dispositivos, los cuales pueden ser agrupados en 16 grupos para direccionar una misma señal de control a todo el grupo, o direccionar de manera individual el control.

En un inicio, este protocolo fue creado para interconectar balastos, actualmente es utilizado para comunicar transformadores de bajo voltaje, sensores de movimiento, de iluminación e interruptores de pared. Algunos comandos típicos utilizados en este tipo de red son: ve al nivel XX de iluminación, ve al nivel mínimo o máximo de iluminación, fija el valor XX como tiempo de regulación, enciende o apaga la luminaria, pregunta: ¿Qué nivel de iluminación tienes?, pregunta: ¿Cuál es tu estado? (encendido, apagado, fallo).

La Fig.2 nos muestra un sistema de iluminación basado en el protocolo DALI, se puede observar que es posible operar varias redes DALI a la vez, al interconectarlas a otra red como lo puede ser una red Ethernet.

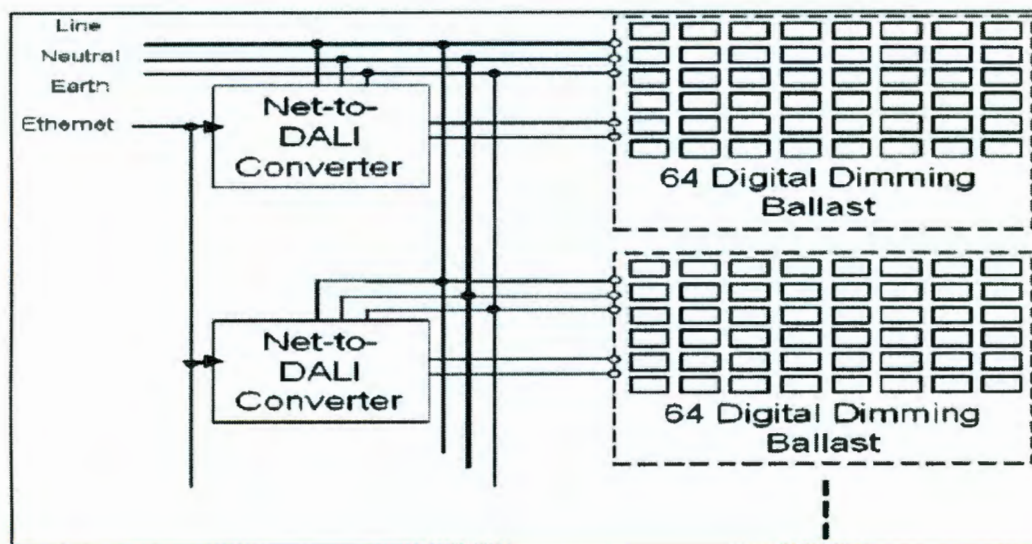


Figura 2. Típico sistema de regulación que utiliza balastos digitales.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Características del edificio

El edificio de clases del postgrado de la Facultad de Ingeniería en la UAQ, 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. (Fig. 3 a y b).

El edificio es de un solo nivel; con el objetivo de proveer de una mejor iluminación, el diseño 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 (Ghisi et al., 2005).



Fig. 3 a)

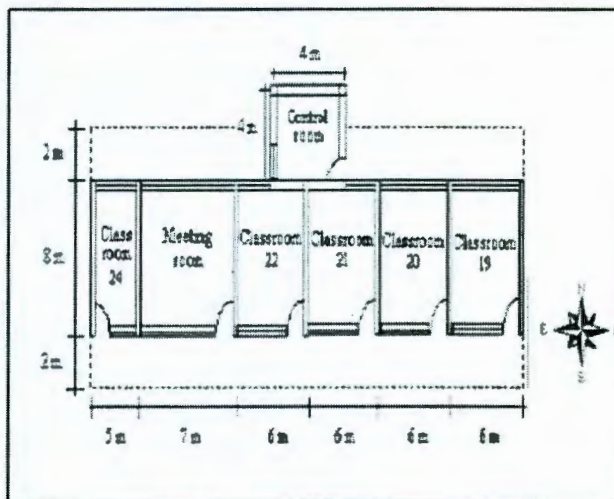


Fig. 3 b)

Figura. 3 a) Edificio sujeto a experimentación

Figura. 3 b) Vista de planta del edificio.

La orientación del sol es la misma para todo el edificio en experimentación, los salones seleccionados para este estudio pueden ser considerados como idénticos de acuerdo a sus características tan similares, por ejemplo, las superficies de ventanas, dimensiones y orientación al sol que presentan los salones del edificio son similares, razón por la cual, será aproximadamente igual la cantidad de luz de día que pueda permear a cada uno de los salones. Otra característica importante a considerar, es que dentro del edificio sujeto a experimentación, existe una sala de juntas, en donde se llevan a cabo presentaciones audiovisuales, razón por la cual, las necesidades en los niveles de iluminación requeridas en esta sala serán distintas.

El edificio cuenta con un sistema de monitoreo de la calidad de la energía eléctrica llamado MonitoUAQ, el cual nos permite monitorear los consumos energéticos de los salones en estudio a lo largo de todo un día, así como también monitorear la calidad de la energía, la ventaja del sistema MonitoUAQ es la de poder monitorear la energía eléctrica a diferentes periodos de muestreo, para este proyecto el periodo de muestreo se ajustó cada 5 minutos (Trejo et al., 2005).

3.2 Propuesta de sistema a implementar

Dadas las características y demandas del edificio sujeto a experimentación, se propone una red de comunicación, en la cual, mediante una PC, se realice el control de la iluminación. Para cumplir con los estándares internacionales, los balastos a emplear en la red de comunicación mediante el protocolo DALI. La topología de la red de balastos es del tipo bus, por lo que si se desconecta una lámpara o deja de funcionar no le produce conflictos a la red (Fig. 4).

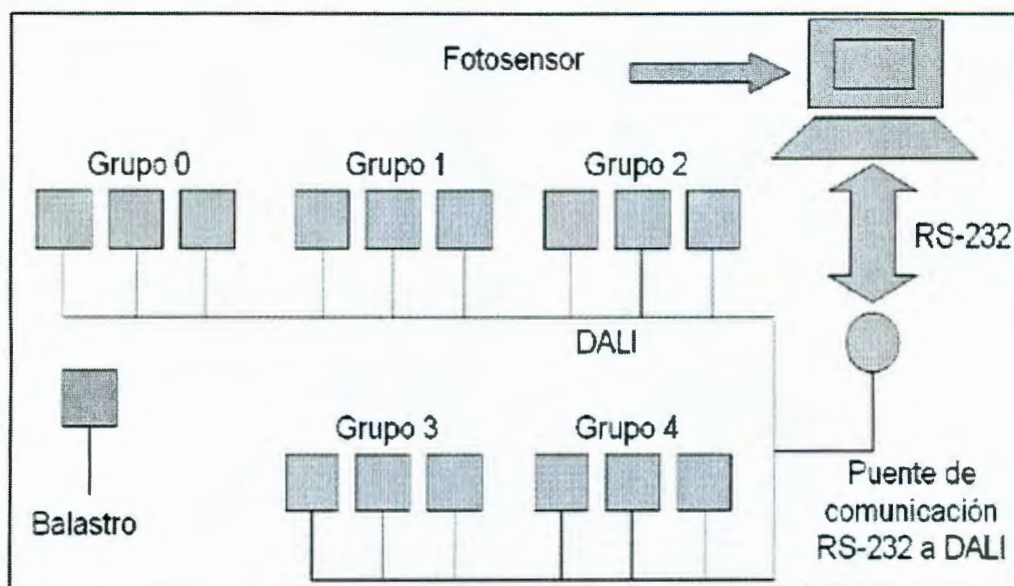


Figura 4. Topología de la red mediante protocolo DALI.

Gracias al protocolo DALI, podemos agrupar a los balastos en diferentes secciones (hasta 16), cada uno de estos grupos nos representan las luminarias existentes en los distintos salones del edificio, gracias a esto, es posible tener una mayor precisión en el control de iluminación, ya que dependiendo del tamaño del salón y de la luz de día detectada por el fotosensor, es posible individualizar la acción de control para cada salón y así asegurar que se cumplan al menos las condiciones de iluminación necesarias al interior de cada uno de los distintos salones.

Dado que es conocido el horario de clases sabemos cuales son los horarios de ocupación de cada uno de los salones de clase, por lo que podemos agregar esta regla al control de encendido de las lámparas para de manera inicial optimizar el ahorro de energía.

Para las pruebas del sistema de iluminación se utilizaron balastos analógicos modelo QTP2X32T8/127 DIM-B, el cual es importado por OSRAM México, este dispositivo ofrece un bajo factor de potencia (FP) mayor al 0.99, una baja distorsión de armónicos (DA) menor al 10%, regulable desde un 5 a 110%, es un balastro de encendido rápido para dos lámparas fluorescentes T8 de 30W. La interfaz digital entre el balastro y la red se realizó mediante un microcontrolador PIC16F876, el cual mediante una señal de PWM previo a un acondicionamiento de señal, envía una señal analógica de 0 a 10V con la cual se regula la luminosidad de las lámparas. La interfaz de comunicación entre la red de balastos y la PC, requiere de utilizar un puente de comunicación RS-232 a DALI, basados en un diseño de microcontroladores de referencia Microchip (AN811).

3.3 Sistema implementado

Para estimar el posible ahorro energético al aprovechar la luz de día, se implementó a manera experimental el sistema mostrado en la Figura 5, realizándose el control de cuatro balastos digitales instalados en el salón 19, se monitoreo la cantidad de luz presente al interior del mismo, el sensor fue instalado en el centro del salón para captar de mejor manera la mezcla de la luz natural que entra por las ventanas de los costados, con la luz artificial proporcionada por las lámparas fluorescentes.

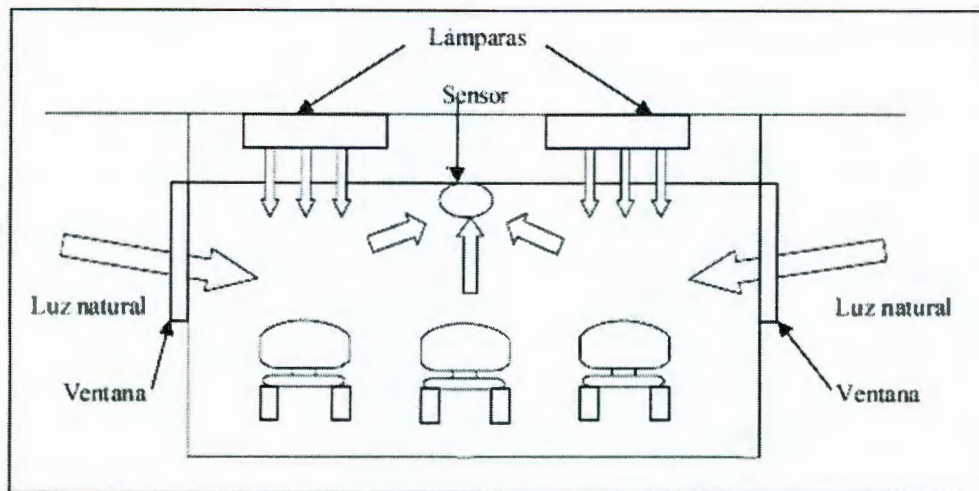


Figura 5.- Disposición física del fotosensor así como distribución prevista de la luz.

Tanto los balastos como el sensor son controlados y monitoreados por la PC que se encuentra instalada en el cuarto de control del edificio en estudio, para llevar un registro del consumo de energía realizado por los balastos a lo largo del día, se encuentra instalado en el cuarto de control el sistema de monitoreo de la calidad de la energía eléctrica MonitoUAQ (Trejo et al., 2005), (Fig. 6).

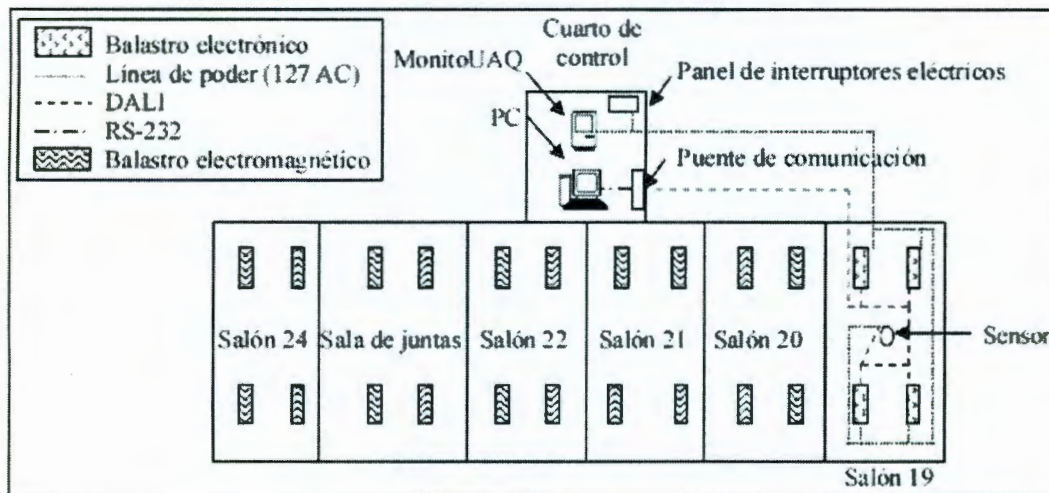


Figura 6.- Sistema implementado para evaluar el ahorro energético.

El elemento fotosensible empleado es el sensor de luz ambiente de alta precisión SFH 5711, el cual en función de la cantidad de iluminación (luxes) de entrada, como salida entrega una corriente logarítmicamente analógica a la entrada. Una de las principales características que diferencia de los fotosensores estándar de silicio, que tiene prácticamente la misma sensibilidad al espectro electromagnético que el ojo humano. La salida de este sensor fue medida por medio de un microcontrolador PIC16F876, el cual en función de la luz presente en el ambiente al interior del salón, genera una señal analógica que va a la entrada del balastro analógico. Esta señal tiene una amplitud de magnitud tal que permita compensar los cambios en iluminación para llegar a un valor de iluminación prefijado.

Para cuantificar el ahorro energético, se realizaron una serie de monitoreos del consumo energético en el salón 19, esto bajo distintas condiciones de operación en la activación de las luminarias, dichos consumos los definimos como sigue:

- a) *Consumo en operación convencional:* Se realizaron mediciones del consumo de energía eléctrica 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.
- b) *Consumo con control horario (encendido-apagado automático):* En este caso, se realiza un corte en el suministro energético de acuerdo a un criterio de 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.
- c) *Consumo con control regulable automático:* En este caso además de realizarse un encendido-apagado automático del suministro energético, los balastos son operados de tal manera en que puedan suministrar el porcentaje de iluminación necesario para mantener las condiciones de iluminación y confort óptimas.

En los tres casos anteriores se realizaron mediciones en el mismo día de la semana (los lunes) en tres diferentes épocas a partir de las 6:45 hasta las 22:10 hrs., con la finalidad de poder obtener datos de consumo a mismos horarios y poder cuantificar los consumos de la energía eléctrica.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Los resultados de las pruebas realizadas en la medición de *consumo en operación convencional* detectaron un mal uso de la iluminación en el transcurso del día, esto se ve reflejado en elevados consumo de energía eléctrica, presentándose un consumo energético equivalentes a 2.592 kWh en el salón 19 durante todo el día en que los usuarios tuvieron el control de encendido-apagado de las lámparas, observamos que se desperdicia luz al activar las lámparas en horarios donde normalmente existe luz natural suficiente o al dejar las luces encendidas por olvido (Fig. 7).

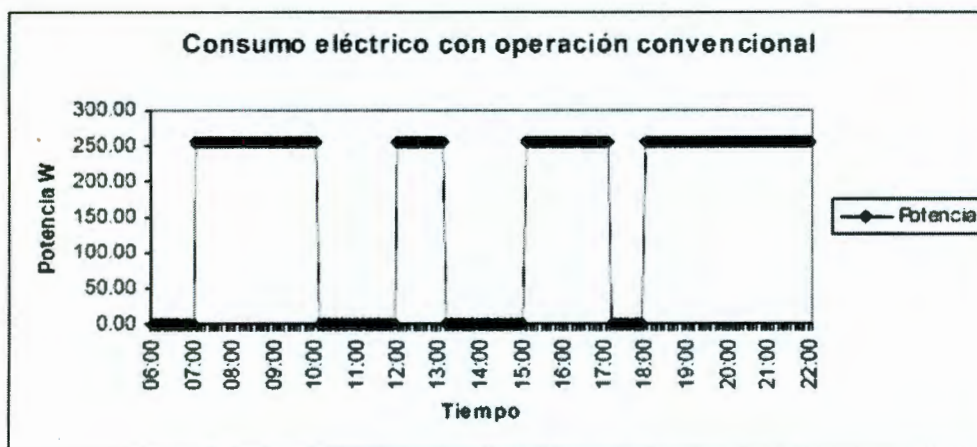


Figura 7. Consumo registrado en operación convencional.

Los resultados para las pruebas realizadas en el *consumo con control horario* en el salón 19, pero ahora durante el día en que se restringió el control a los usuarios, y se implementó un control encendido-apagado en función de la hora del día, es decir, las lámparas sólo fueron encendidas en horarios donde muy probablemente no exista la suficiente luz natural al interior de los salones y además que estuviera en uso el salón, como vemos, con este sencillo control ya se logró eliminar los desperdicios de energía eléctrica que normalmente generan los usuarios al hacer un mal uso de las lámparas (Fig. 8).

La Fig. 8 muestra un consumo racional de uso de la iluminación durante todo el día, observando un ahorro en el consumo de la energía eléctrica, en el cual solo se consumieron 1.653 kWh al implementar el sistema de *encendido-apagado automático*.

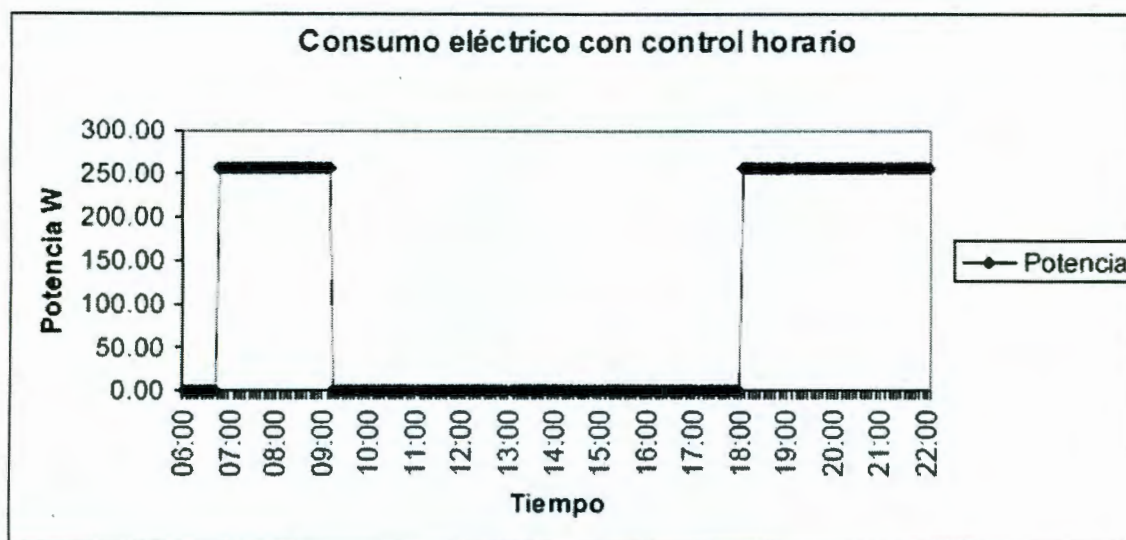


Figura 8. Consumo registrado con un control horario (encendido-apagado automático).

Finalmente, en la Fig. 9 se muestra el consumo energético *consumo con control regulable automático*, el cual regula la cantidad de luz que entregan las lámparas en función del nivel de iluminación presente al interior del salón, como podemos ver, al hacer el control regulable el consumo de energía eléctrica registrado fue de 0.774 kWh logrando así un ahorro energético de 52% (comparado con el control horario) sin comprometer el confort de los usuarios.

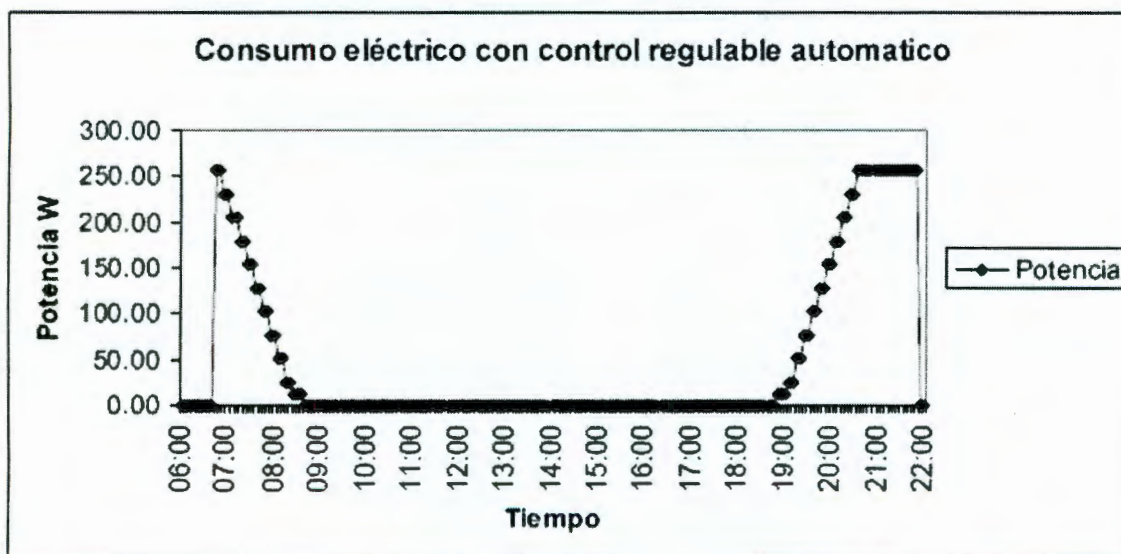


Figura 9. Consumo registrado con un control regulable automático.

La Tabla 1 muestra los consumos de energía eléctrica en el salón 19 para los tres sistemas de medición de energía eléctrica: *consumo en operación convencional*, *consumo con control horario (encendido-apagado automático)* y *consumo con control regulable automático*. Se muestra en esta investigación una primera etapa de mediciones de consumo de energía eléctrica de iluminación la cual tratamos de realizar para condiciones de uso similar de ocupación de acuerdo a los horarios de uso normal de ocupación del salón, con la finalidad de poder obtener resultados reales del comportamiento del consumo de energía eléctrica. En la primera etapa se puede observar que el *consumo en operación convencional* de iluminación tubo un consumo total de 2.592 kWh, mientras que el *consumo con control horario* de 1.653 kWh, y *consumo con control regulable automático* muestra un consumo mínimo de energía eléctrica de 0.774 kWh, obteniendo en esta primera etapa un ahorro superior al 50% del ya logrado al implementar el *control horario*, del total del consumo de la energía eléctrica, en cuanto a iluminación se refiere. Los valores del porcentaje de consumo y ahorro (columnas 3 y 4) de la Tabla 1 fueron calculados con respecto al valor medido con el control horario. El cual se utilizo como referencia debido a que es un indicador de consumo racional donde se supone que no hay desperdicio por mal uso de los recursos. De esta manera un consumo que exceda dicho valor se considera un desperdicio y valores por debajo representan un ahorro.

Sistema de iluminación	Consumo en kWh	Consumo en %	Ahorro en %
Convencional	2.592	157	-57
Control horario	1.653	100	0
Control regulable	0.774	47	53

Tabla 1. Consumos de energía eléctrica de los sistemas de iluminación

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se observo que al restringir el control a los usuarios, evitamos los desperdicios energéticos que estos generan al hacer un mal uso de las lámparas. Las pruebas preliminares del sistema de control automático de iluminación ha dado buenos resultados, con ahorros potenciales mayores al 50% del total del consumo de energía eléctrica en cuanto a iluminación se refiere, esto sin la necesidad de utilizar un control una técnica de control tan sofisticado como lo pudiera ser un controlador inteligente por ejemplo, además cabe resaltar que el ahorro logrado en ningún momento comprometió el confort de los usuarios. Por otra parte, el sistema de control automático de iluminación propuesto nos permite extenderlo fácilmente al resto del edificio e inclusive al resto de la Facultad, además de que cumplimos con un estándar internacional de comunicación para los balastros, lo cual asegura la interoperabilidad de los balastros utilizados con otros de distintos fabricantes existentes en el mercado.

La información presentada en este trabajo servirá como complemento para una estrategia de control inteligente en todo el edificio de posgrado, donde en base al control automático del sistema de iluminación se reduzca más del 50% el consumo de energía eléctrica debido a iluminación. Además, se podrán diseñar los balastros regulables que empleemos en el sistema de control de iluminación, basándonos en la técnica de diseño aquí mencionada, con la finalidad de abaratar aun más los costos del sistema en el sistema de iluminación, dado que los balastros digitales disponibles en el mercado son relativamente costosos aún.

7. REFERENCIAS

- Harrison A. y Loe E., Read J., 1998, Intelligent Buildings in South East Asia, E & FN SPON, London.
- Kolokotsa D. Niachou K. Geros V. Kalaitzakis K. Stavrakakis G.S. y Santamouris M., 2005, Implementation of an integrated indoor environment and energy management system, In: Energy and buildings 37: 93-97.
- Fernández de Torres R. y Remacha Vallejo M., 2000, Luz y salud: la respuesta inteligente mediante el alumbrado artificial. XXX Simposium nacional de iluminación Roquetas del mar.

Ghisi E. y Tinker J. 2005, An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings, Building and environment. 40: (51-61)

Ribarich T. y Contenti C., 2002, Analog and Digital Fluorescent Lighting Systems, Technical Paper, International Rectifier.

Ribarich T. Ribarich J., 1998, A New Control Method for Dimable High Frequency Electronic Ballast, In: IEEE-IAS Conf. Rec., 2038-2043.

Trejo Perea M. Rios Moreno G.J. Rivas E. y Rauch V. 2005, Savings and analysis of the consumption and quality of the energy, 1er international Congress of Engineering, Universidad Autónoma de Querétaro, México. 253-261.

The RS-232/DALI bridge interface, AN811, www.microchip.com.