



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

**Sistema de control inteligente de sombras para el confort lumínico en
oficinas de edificios públicos.**

TESIS
QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:
Maestro en Ciencias

Presenta:
Ing. Gonzalo Reyes Alonso

Dirigido por:
Dr. Mario Trejo Perea

SINODALES

Dr. Mario Trejo Perea
Presidente

Dr. José Gabriel Ríos Moreno
Secretario

Dr. Luis Alberto Morales Hernández
Vocal

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Suplente

M. en C. Guillermo Ronquillo Lomeli
Suplente



Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



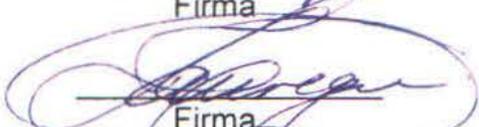
Firma



Firma



Firma



Firma



Firma



Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2014
México

RESUMEN

Actualmente, del total de la energía eléctrica generada en el mundo, cerca del 90% de ella requiere de procesos de extracción y combustión de combustibles fósiles. Expertos aseguran que la mitad de las reservas de combustibles fósiles con las que cuenta el mundo habrán sido consumidas en un 50% para el 2015. En México un 70% de la energía eléctrica es generada mediante hidrocarburos. Durante el proceso de conversión de energía, existe también una gran producción de CO₂, lo que debilita la capa de ozono y contribuye al calentamiento global. Los edificios son responsables de alrededor del 40% del consumo total de energía anual a nivel mundial. Los sistemas de iluminación en el sector comercial consumen alrededor del 30-40% del total de la energía eléctrica en el mundo. El propósito de este trabajo es desarrollar un sistema de control inteligente de sombras para satisfacer las necesidades del confort lumínico al interior de oficinas de edificios públicos, con un impacto en el ahorro de energía eléctrica a través del control de una persiana enrollable motorizada, basado en el monitoreo de las variables lumínicas internas y externas. Se implementa, para el desarrollo del sistema de control de iluminación un controlador difuso en un controlador programable (PLC), por medio del uso de sensores de iluminación, lámparas de balastro dimeable y una persiana motorizada; con ello se logra obtener un ahorro energético alrededor del 60% y al mismo tiempo mantener el confort lumínico al interior de las oficinas del edificio, con el desarrollo e implementación de un sistema de control inteligente de sombras se logra contribuir a la generación de la sustentabilidad en oficinas de edificios públicos.

Palabras clave: Ahorro de energía, control de iluminación, confort visual, lógica difusa, edificios públicos, control de sombras.

SUMMARY

Currently, the total electricity generated in the world, about 90 % of it requires processes of extraction and combustion of fossil fuels. Experts say half of the fossil fuel reserves that comprise the world will have been consumed by 50 % by 2015. In Mexico 70% of electricity is generated by oil. During the process of energy conversion, there is also a large production of CO₂, weakening the ozone layer and contribute to global warming. Buildings are responsible for about 40 % of the total annual consumption of energy worldwide. Lighting systems in the commercial sector consume about 30-40 % of the total electricity in the world. The purpose of this work is to develop an intelligent control shadows to meet the needs of lighting comfort into offices of public buildings, with an impact on saving power through the control of a motorized roller blind, based on monitoring internal and external lighting variables. Is implemented for the development of the control system of lighting a fuzzy controller which is implemented in a programmable controller (PLC) and through the use of light sensors, lamp dimmable ballast and a motorized shade is unable to obtain an energy saving around 62% and keeping the lighting comfort inside the offices, with the development and implementation of an intelligent control system is achieved shadows contribute to the generation of sustainability in public office buildings.

Key words: Energy saving, light control, visual comfort, fuzzy logic, public buildings, shadow control.

DEDICATORIAS

A mi esposa e hijos.
Porque el tiempo no va a regresar.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios que me ha permitido hasta éste momento escribir estas líneas.
- A mi esposa e hijos por su apoyo incondicional en todo este tiempo.
- A los Doctores José Gabriel y Mario por compartirme toda su sabiduría.

Muchas Gracias...

ÍNDICE

Contenido	Página
Resumen.....	i
Summary.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice.....	v
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	ix

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Estado del arte.....	4
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo general.....	7
1.4.2 Objetivos particulares.....	7
1.5 Justificación.....	8

CAPÍTULO II

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

2.1 Lógica difusa.....	9
2.1.1 Operaciones con conjuntos difusos.....	10
2.1.2 Relaciones difusas.....	11
2.2 Inferencia difusa.....	13
2.2.1 Fundamentos de lógica proposicional.....	14
2.2.2 implicación difusa.....	17
2.3 Reglas difusas.....	19
2.4 Diagrama de bloques de un sistema basado en técnicas de lógica difusa...	20
2.4.1 Fuzzificador.....	21
2.4.2 Bloque de inferencia.....	22
2.4.3 Defuzzificador.....	22
2.5 Mecanismos de inferencia.....	23

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Mediciones de campo.....	25
3.1.1 Características del edificio.....	25
3.1.2. Características de las oficinas.....	26
3.2 Consideraciones para determinar el confort lumínico.....	28
3.3 Ubicación del plano de trabajo.....	29
3.3.1. Lecturas en el plano de trabajo con persianas verticales de PVC y lámparas de 32W	29
3.3.2 Lecturas del número de lux en el plano de trabajo sin persianas	30
3.4 Características y desarrollo y de la instrumentación del sistema de iluminación.....	31
3.5 Desarrollo del algoritmo de la lógica difusa en el FuzzyDesigner.....	36
3.6 Lógica borrosa en el controlador lógico programable RSLogix 5000..	40

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Algoritmo de la lógica difusa en el FuzzyDesigner.....	37
4.2 Sistema inteligente real.....	41
4.3 Algoritmo ideal contra el real.....	42
4.4 Ahorro energético del sistema inteligente.....	43

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES.....	45
-----------------------------	-----------

REFERENCIAS.....	46
-------------------------	-----------

ANEXOS

A. ARTÍCULO PUBLICADO.....	50
----------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1. Esquema de un sistema de luz especular.....	4
1.2. Modelo de la cámara de prueba.....	5
1.3. La distribución de luz para una planta típica en Komtar durante el cielo nublado.....	5
2.1. Esquema general de un sistema basado en lógica difusa.....	20
2.2. Conjuntos difusos a considerar, a la izquierda conjunto triangular y a la derecha conjunto trapezoidal.....	21
2.3. Defuzzificador de centros.....	23
3.1. Vista sur oriente del edificio F.....	25
3.2. Vista satelital del edificio F.....	25
3.3. Planta alta del Edificio F.....	26
3.4. Características de las oficinas.....	27
3.5. Vista superior de la oficina C-9.....	27
3.6. Oficina C-9 vista lateral noroeste	28
3.7. Identificación del plano de trabajo de la oficina C-9.....	29
3.8. Número de luxes en el plano de trabajo A1 con persiana vertical de PVC.....	30
3.9. Número de luxes en el plano de trabajo A1 sin la persiana de PVC.....	31
3.10. Controlador Lógico Programable PLC.....	31
3.11. Cableado en el módulo de entradas digitales.....	32
3.12. Cableado en el módulo de salidas digitales.....	32
3.13. Cableado en el módulo de E/S analógicas.....	33
3.14. Lámparas fluorescentes de balastro dimeable.....	34
3.15. Persiana motorizada modelo Screen 550.....	35

3.16. Sensor de iluminación SFH_5711.....	34
3.17 Elementos constitutivos del proyecto.....	35
3.18. Variables lingüísticas de entrada del sensor exterior.....	37
3.19. Variables lingüísticas de entrada sensor interior.....	38
3.20. Variables lingüísticas para la persiana motorizada.....	39
3.21. Variables lingüísticas para la lámpara dimeable.....	40
3.22. Diagrama en escalera del sistema inteligente.....	40
4.1. Algoritmo inteligente ideal.....	41
4.2. Algoritmo inteligente real.....	42
4.3. Grafica en 3D del sistema inteligente.....	42
4.4. Potencia consumida por hora en la oficina C-9 con el sistema inteligente.....	44
4.5. Sistema real del controlador de lógica difusa.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Página
2.1. Tabla de verdad de las principales operaciones lógicas.....	15
2.2. Correspondencia entre operadores lógicos y de teoría de conjuntos.....	15
2.3. Correspondencia entre operadores lógicos y algebraicos.....	15
4.1. Potencia real consumida y número de luxes con respecto al tipo de lámpara.....	41

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

En las últimas décadas, debido a los estilos de vida moderna y al crecimiento de la población a nivel mundial, la demanda de energía eléctrica ha aumentado de forma exponencial, de continuar con esta tendencia es posible que la demanda exceda en la capacidad de abastecimiento (Lew, 2000; Omer, 2008). En el proceso de la generación de energía eléctrica, cada año se producen en el mundo millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global (Di Stefano, 2000; Lew, 2000; Omer, 2008). Investigaciones recientes muestran el uso de energías limpias para el desarrollo sustentable como una alternativa a la reducción del consumo de los combustibles fósiles, sin embargo, esto representa un alto costo y un lento crecimiento en el desarrollo de estas tecnologías (Midilli y Dincer, 2006). Teniendo esto en cuenta, se presenta una oportunidad muy óptima para contribuir a contener el crecimiento exponencial de este recurso; esta oportunidad se da en los llamados "edificios inteligentes" un concepto de tecnologías de la información, además de facilitar un entorno de trabajo cómodo procurando optimizar el uso de la energía eléctrica al minimizar los costos operativos (Wong, et al., 2005). Hoy en día, un edificio inteligente se compone de un conjunto de sistemas dinámicos y sensibles, diseñados para satisfacer los requisitos del usuario, a fin de proporcionar una alta productividad y rentabilidad en los entornos operativos (Osterhaus 2005, Wong et al., 2008).

Los sistemas de control de iluminación son parte de una construcción inteligente, estos sistemas deben ser dinámicos y flexibles para adaptarse a las condiciones de iluminación con el fin de maximizar la luz natural y para asegurar el confort visual de los usuarios (Doulos et al., 2008).

Para la buena práctica de iluminación es esencial que además de la iluminación requerida se satisfagan necesidades cualitativas y cuantitativas. Los requisitos de iluminación son determinados por la satisfacción de tres necesidades humanas básicas (Atif y Galasiu, 2003).

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

Por lo tanto una iluminación correcta es aquella que permite distinguir las formas, los colores, los objetos en movimiento y apreciar los relieves, y que todo ello, además, se haga fácilmente y sin fatiga, es decir, que asegure el confort visual permanentemente. Para asegurar el confort visual hay que tener en cuenta básicamente tres puntos, que situados por orden de importancia son los siguientes (Markham, 2010):

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

Para permitir que las personas realicen tareas visuales de modo eficiente y preciso, debe preverse una iluminación adecuada y apropiada. La iluminación puede ser proporcionada mediante luz natural, alumbrado artificial o una combinación de los mismos. Para satisfacer los requisitos de iluminación para lugares de trabajo en interiores, en cuanto a las necesidades de confort y requisitos visuales se considera la norma española (Norma UNE-EN, 2003). La luz natural puede proporcionar la totalidad o parte de la iluminación para las tareas visuales.

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

En los interiores con ventanas laterales, la luz natural disponible disminuye rápidamente con la distancia a la ventana. Es necesario un alumbrado suplementario para asegurar la iluminancia requerida en el puesto de trabajo y para equilibrar la distribución de luminancias dentro de la sala. Puede usarse conmutación y/o regulación del flujo luminoso automático o manual para asegurar la integración apropiada entre alumbrado eléctrico y luz natural (Norma UNE-EN, 2003).

También se tiene que durante el periodo 1997-2007, el consumo nacional de energía eléctrica mantuvo un crecimiento medio anual de 3.9%, como resultado de la dinámica de los sectores residencial y mediana industria principalmente. En el 2007 las ventas totales fueron de 106,663 GWh en donde el sector industrial consumió el 59.1%, el sector residencial consumió el 25.4%, el sector comercial consumió el 7.4%, el bombeo agrícola con 4.3% y finalmente el sector servicios con el 3.8% (SENER, 2008).

Se reporta que alrededor del 25% del total de la electricidad en el sector comercial es consumida por los sistemas de iluminación (Bleeker, 1993). El consumo oscila mucho de un país a otro y no es sólo debido a las condiciones climáticas y de diseño, sino también culturales y hábitos. En China, el uso de la iluminación en edificios comerciales es del 15% (Min et al., 1995); en los EE.UU., el 39% (EIA, 1994); en los Países Bajos, 55% (Sliepenbeek et al., 1995), y en el Reino Unido se sitúa entre un 30% al 60% (BS, 1992). En Brasil, la iluminación en los edificios de uso comercial con aire acondicionado es de aproximadamente 24%, pero en edificios comerciales sin aire acondicionado, la iluminación puede llegar al 70% del consumo total de la energía en el edificio (PROCEL, 1993).

1.2 Estado del arte

Se han realizado trabajos para analizar los resultados del confort lumínico en salones de clase en el Federal Center of Technological Education of Paraná, Brasil; donde se utiliza por lo general la iluminación artificial por sistema de luz especular Figura. 1.1 y obteniendo hasta 926 Lux en el transcurso de la mañana y mayores de 1500 lux entre las 13:00 a las 15:00 horas, (Krüger y Paulo, 2004).



Figura 1.1. Esquema de un sistema de luz especular.

También en la universidad de Ljubljana, Slovenia se llevaron a cabo estudios del control de iluminación dinámica por medio del desarrollo de una maqueta mediante el funcionamiento de una persiana enrollable como un dispositivo de regulación, utilizando lógica difusa (Figura. 1.2), obteniendo como resultado una desviación de ± 20 Lux del confort lumínico. Dicho sistema de control permite el uso óptimo de la energía solar disponible para tener un confort lumínico y en parte también en el confort térmico interior (Mateja et al., 2006).



Figura 1.2. Modelo de la cámara de prueba.

Así también se llevó a cabo un estudio del control solar para edificios en la National Natural Science Foundation in China, obteniendo el resultado que el sur es la orientación óptima de los edificios tanto para la ganancia de calor solar en invierno y el control de iluminación natural en el verano (Mingfang, 2002).

En Penang Komtar (en Malasia), que es un edificio casi circular se han realizado estudios en la distribución de la luz natural en el interior de este, teniendo como resultado un alta luminancia para desarrollar un eficiente control de sombras, Figura 1.3 (Syed y Sia, 2004).



Figura 1.3. La distribución de luz para una planta típica en Komtar durante el cielo nublado.

Ha habido muchos avances en materia de energía y ciencia en los edificios en las últimas décadas, pero muchos edificios nuevos no son todavía diseñados para aprovechar la luz del día y se puedan integrar lo suficiente en los sistemas de iluminación artificial, en los casos en que exista una integración, se ha obtenido un potencial de ahorro de energía en iluminación entre 10.8% a 44.0% con una iluminación externa de 5,000 lux, y entre 20.6% y 86.2% para una iluminación externa de 10,000 lux; estos resultados obtenidos a través del diseño de una ventana ideal (Ghisi y Tinker, 2005).

Así también algunos estudios de casos con respecto a la iluminación natural se han obtenido ahorros de energía de hasta un 50% a lo largo de la pared de la ventana debido a la capacidad de disponibilidad de luz visible; además, la luz del día en los edificios es preferida por la mayoría de los ocupantes (Atif y Galasiu, 2003).

Por lo anterior un diseño de control de sombras para edificios de salones de clase podría promover el uso eficiente del uso de la energía en cuanto a iluminación de se refiere al aprovechar la luz natural que de manera gratuita nos ofrece el medio ambiente con un impacto en el confort visual, es decir garantizando los niveles adecuados de iluminación al interior de los salones de clase; favoreciendo la sustentabilidad energética.

1.3 Hipótesis

Al desarrollar un sistema de control inteligente de sombras se pueden generar ahorros hasta un 50% en el consumo de energía eléctrica en cuanto a iluminación se refiere y al mismo tiempo satisfacer las necesidades del confort lumínico al interior de oficinas de edificios públicos, basado en el monitoreo de las variables lumínicas internas y externas.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de control inteligente de sombras para satisfacer las necesidades de confort lumínico al interior de oficinas de edificios públicos, a través de un controlador lógico programable (PLC) y por medio de una persiana enrollable motorizada, basado en el monitoreo de las variables lumínicas internas y externas, para un impacto en el ahorro de energía eléctrica.

1.4.2. Objetivos particulares

- Conocer el estado del arte sobre control de iluminación por sombras para el ahorro de energía eléctrica, para tener la cuantificación en el ahorro las aplicaciones en sistemas de control inteligente.
- Evaluar las variables lumínicas internas y externas (Nivel de iluminación, deslumbramientos y equilibrio de las luminancias) mediante sensores de iluminación en el edificio público para el confort lumínico.
- Cuantificar los ahorros de energía eléctrica mediante el sistema integral de iluminación.

1.5 Justificación

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 (Krüger et al., 2004). Debido al elevado costo de la energía eléctrica en México aumento el 100% de 1999 al 2009 (Precios medios, Sener 2010), al disminuir el consumo de energía eléctrica, no solo 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 (México se encuentra dentro de los 15 principales países generadores de Gases de Efecto invernadero al generar 643,183 millones de toneladas de CO₂. Por lo anterior un diseño de control inteligente de sombras para el confort lumínico en edificios públicos promueve el uso eficiente (ahorros del 50%) del uso de la energía en cuanto a iluminación se refiere al a provechar la luz natural que de manera gratuita nos ofrece el medio ambiente con un impacto en el confort visual, es decir garantizando los niveles adecuados de iluminación al interior de los salones de clase; favoreciendo la sustentabilidad energética.

CAPÍTULO II

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Uno de los acontecimientos más importantes dentro de la tecnología de los microprocesadores inteligentes es el uso del control en los sistemas de iluminación inteligente. Estos controles proporcionar mayor flexibilidad, lo que lleva a una mejor gestión de la luz. Ellos hacen posible crear un entorno estéticamente agradable, y al mismo tiempo tener ahorros de energía. El concepto detrás de estos controles es operar la iluminación automáticamente de acuerdo a la función de una zona, la hora del día, los niveles de luz ambiental y de la ocupación (Nikolaou et al., 2005).

Los controles de iluminación inteligente tienen muchas ventajas sobre los sistemas de control convencional, teniendo la capacidad de la creación de un ambiente confortable, mayor flexibilidad de diseño, ahorro de energía, reducción de los costos de reemplazo de las lámparas y la seguridad. Las tres operaciones de medición, decisión y acción, siempre están presentes en todo tipo de control (Nikolaou et al., 2005).

2.1 Lógica difusa

Una rama importante de la teoría de conjuntos difusos, son las técnicas de control basadas en lógica difusa, se han utilizado ampliamente desde la invención del primer controlador difuso en 1974 "Mamdani 1974", debido a que en su aplicación no es necesario conocer el modelo matemático de la planta a controlar. Además el control de las plantas no lineales como los sistemas de IB, se utilizan técnicas de control difuso que han demostrado tener un mejor rendimiento con respecto a los controladores clásicos (Kolokotsa, 2003; Mateja, et al., 2006). El control difuso es una técnica de control inteligente que imita el

razonamiento humano (Kovacic y Bogdan, 2006), este control está basada en el conocimiento experto humano (Diedier y Henri, 1980; Babuska, 1998).

2.1.1 Operaciones con conjuntos difusos

Las operaciones básicas entre conjuntos difusos son las siguientes:

- El conjunto complementario \bar{A} de un conjunto difuso A es aquel cuya función característica viene definida por la ecuación 1:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (1)$$

- La unión de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cup B$ en U cuya función de pertenencia está definida por la ecuación 2:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2)$$

- La intersección de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso $A \cap B$ en U con función característica en la ecuación 3:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3)$$

Estas tres operaciones definidas para conjuntos difusos cumplen, al igual que en la teoría clásica de conjuntos, asociatividad, conmutatividad y distributividad así como las leyes de Morgan.

Sin embargo, también hay que destacar que existen dos leyes fundamentales de la teoría clásica de conjuntos como son el Principio de contradicción $A \cup \bar{A} = U$, y el principio de exclusión $A \cap \bar{A} = \phi$ que no se cumplen en

la teoría de conjuntos difusos; de hecho una de las formas para describir en qué se diferencia la teoría clásica de conjuntos de la teoría difusa es explicar que estas dos leyes en términos de lógica difusa no se cumplen. En consecuencia, algunas de las teorías derivadas de la teoría de lógica no se cumplen.

Las funciones que definen la unión y la intersección de conjuntos difusos pueden generalizarse, a condición de cumplir ciertas restricciones. Las funciones que cumplen estas condiciones se conocen como Conorma Triangular (T-Conorma) y Norma Triangular (T-Norma). Los principales operadores que cumplen las condiciones para ser T-Conormas son el operador máximo y la suma algebraica $\mu_{A \cup B}(x) = [\mu_A(x) + \mu_B(x)] - [\mu_A(x)\mu_B(x)]$ y los principales operadores que cumplen las condiciones para ser T-Normas son el operador mínimo y el producto algebraico $\mu_{A \cap B}(x) = [\mu_A(x)\mu_B(x)]$.

En la mayoría de las aplicaciones a la ingeniería de la lógica difusa se usan como T-Conorma el operador máximo y como T-Norma los operadores mínimo o producto (Passino, 1998).

2.1.2 Relaciones difusas

Una relación difusa representa el grado de presencia o ausencia de asociación, interacción o interconexión entre elementos de dos o más conjuntos difusos, por ejemplo: " x es mayor que y ". Supongamos U y V dos universos de discurso, la relación difusa $R(U, V)$ es un conjunto difuso en el espacio producto $U \times V$ que se caracteriza por la función de pertenencia $\mu_R(x, y)$ donde x pertenece a U , y pertenece a V , como en la ecuación 4:

$$R(U, V) = \{((x, y), \mu_R(x, y)) | (x, y) \in U \times V\} \quad (4)$$

En el caso de las relaciones difusas $\mu_R(x, y) \in [0,1]$ y en caso de las relaciones clásicas $\mu_R(x, y) \in [0,1]$ ó 1. Como las relaciones difusas son en sí mismas un conjunto difuso en el espacio producto, las operaciones entre conjuntos y los operadores definidos anteriormente también pueden ser aplicadas a ellas. Supongamos $R(x, y)$ y $S(x, y)$ dos relaciones en el mismo espacio producto $U \times V$. La intersección o unión entre R y S , que son composiciones entre las dos relaciones, se definen como:

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) * \mu_S(x, y) \quad (5)$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y) \quad (6)$$

dónde $*$ es cualquier T-Norma, y \oplus es cualquier T-Conorma.

Si consideramos las relaciones difusas R y S que pertenecen a diferentes espacios producto $R(U, V)$ y $S(V, W)$, por ejemplo " x es mayor que y " y " y es cercano a z ", su composición difusa se define de forma análoga a la composición clásica teniendo en cuenta que en el caso difuso la relación difusa R tiene asociada una función característica $\mu_R(x, y)$ que toma valores en el intervalo $[0,1]$ y la relación difusa S también tiene asociada una función característica $\mu_S(y, z)$ que de igual forma toma valores en el intervalo $[0,1]$. Entonces la composición difusa entre R y S , es decir $R \circ S$, cuando R y S pertenecen a universos discretos de discurso, se define como una relación difusa en $U \times W$ cuya función de pertenencia viene dada por la ecuación 7:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \sup_{y \in V} [\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)] \quad (7)$$

dónde el operador \sup es el máximo y el operador $*$ puede ser cualquier T-Norma. En función de la T-Norma elegida podemos obtener distintas composiciones; las dos composiciones más usadas son la composición máx-min y la composición máx-

product:

- La composición máx-min de las relaciones difusas $R(U, V)$ y $S(V, W)$, es una relación difusa $R \circ S$ en $U \times W$ definida por la función de pertenencia:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \max_{y \in V} [\min(\mu_R(x, y), \mu_S(y, z))] \quad (8)$$

dónde $(x, z) \in U \times W$.

- La composición máx-product de las relaciones difusas $R(U, V)$ y $S(V, W)$, es una relación difusa $R \circ S$ en $U \times W$ definida por la función característica:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \max_{y \in V} [\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)] \quad (9)$$

dónde $(x, z) \in U \times W$.

2.2 Inferencia difusa

Se llama reglas difusas al conjunto de proposiciones IF-THEN que modelan el problema que se quiere resolver. Una regla difusa simple tiene la forma:

"si u es A entonces v es B "

dónde A y B son conjuntos difusos definidos en los rangos de " u " y " v " respectivamente. Una regla expresa un tipo de relación entre los conjuntos A y B cuya función característica sería $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ y representa lo que conocemos como implicación lógica. La elección apropiada de esta función característica está sujeta a las reglas de la lógica proposicional (Passino, 1998).

Como es bien sabido se puede establecer un isomorfismo entre la teoría de conjuntos, la lógica proposicional y el álgebra booleana que garantiza que cada teorema enunciado en una de ellas tiene un homólogo en las otras dos. La existencia de estos isomorfismos nos permitirá traducir las reglas difusas a relaciones entre conjuntos difusos y éstas a términos de operadores algebraicos con los que podremos trabajar.

2.2.1 Fundamentos de lógica proposicional

En la teoría de la lógica clásica una proposición sólo puede ser cierta o falsa, no admite términos medios; además las proposiciones pueden combinarse de muchas maneras, utilizando tres operaciones fundamentales:

- Conjunción ($p \wedge q$): las dos proposiciones son ciertas simultáneamente.
- Disyunción ($p \vee q$): cualquiera de las dos proposiciones es cierta.
- Implicación ($p \rightarrow q$): el cumplimiento o la verdad de una de las proposiciones tiene como consecuencia el cumplimiento de la otra; generalmente toma la forma de una regla si-entonces. La parte de la regla encabezada por el condicional si " u es A ", es el antecedente o premisa de la regla, mientras que la parte encabezada por entonces, entonces " v es B ", es el consecuente o conclusión de la regla; también existe el operador:
- Negación ($\sim p$) que invierte el sentido de la proposición.

La tabla de verdad de estas operaciones que se pueden realizar entre las proposiciones es la que se muestra a en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Tabla de verdad de las principales operaciones lógicas.

p	q	$p \wedge q$	$p \vee q$	$p \rightarrow q$	$\sim p$
V	V	V	V	V	F
V	F	F	V	F	F
F	V	F	V	V	V
F	F	F	F	V	V

Algunas equivalencias de estos operadores con los operadores utilizados en teoría de conjuntos son las siguientes que se muestran en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2. Correspondencia entre operadores lógicos y de teoría de conjuntos.

Lógica proposicional	Teoría de conjuntos
\wedge	\cap
\vee	\cup
\sim	-

y con los operadores algebraicos se muestran en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Correspondencia entre operadores lógicos y algebraicos.

Lógica proposicional	Álgebra de Boole
V	1
F	0
\wedge	\times
\vee	+
\sim	'
\leftrightarrow	=
P,q,r	a,b,c

dónde la comilla (') representa el complementario y a,b,c son elementos del conjunto $[0,1]$. Una tautología se define como una proposición formada por la combinación de otras proposiciones y cuya verdad es independiente de la certeza o falsedad de las proposiciones que la forman. La tautología más importante para el ámbito en el que trabajamos es $(p \rightarrow q) \leftrightarrow \sim [p \wedge (\sim q)]$; que también puede ser expresada como $(p \rightarrow q) \leftrightarrow \sim (p) \vee q$.

La importancia de las tautologías reside en que nos permitirán expresar la función característica de la relación de implicación $(p \rightarrow q)$ en términos de las funciones características de $p, q, \sim p$ y $\sim q$.

En la teoría clásica proposicional existen dos importantes reglas de inferencia, el Modus Tollens y el Modus Ponens: El Modus Ponens o razonamiento directo puede resumirse de la siguiente forma:

Premisa 1: "x es A".

Premisa 2: Si "x es A", ENTONCES "y es B".

Consecuencia: "y es B".

El Modus Ponens está asociado a la implicación "A implica B" ($A \rightarrow B$) y en términos de lógica proposicional se expresa $(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q$.

- El Modus Tollens o razonamiento inverso que puede resumirse de siguiente forma:

Premisa 1: "y es No B".

Premisa 2: "Si x es A ENTONCES y es B".

Consecuencia: "x es No A".

En términos de lógica proposicional esto se expresa: $(\bar{q} \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow \bar{p}$.

El Modus Ponens es el utilizado en las aplicaciones de la lógica a la ingeniería ya que conserva la relación causa-efecto mientras que el Modus Tollens apenas se utiliza (Passino, 1998).

2.2.2 Implicación difusa

Al igual que para describir las nociones básicas de la teoría de conjuntos difusos podemos establecer un paralelismo con las de la teoría clásica de conjuntos, también los fundamentos de la teoría de la lógica difusa parten y toman los conceptos fundamentales de la lógica clásica. Como ya hemos visto, en términos de teoría de lógica difusa la proposición "SI u es A , ENTONCES v es B , donde $u \in U$ y $v \in V$, tiene asociada una función característica $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ que toma valores en el intervalo [0,1]. Es decir, cada una de las reglas o proposiciones if-then es a su vez un conjunto difuso con su función característica que mide el grado de verdad de la relación de implicación entre x e y . Ejemplos de posibles funciones características asociadas, extraídas de aplicar las analogías entre operadores y la tautología antes mencionada, se presentan en las ecuaciones 10,11 y 12:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = 1 - \mu_{A \cap B}(x, y) = 1 - \text{mín}[\mu_A(x), 1 - \mu_B(y)] \quad (10)$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \text{máx}[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (11)$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = 1 - \mu_A(x)(1 - \mu_B(y)) \quad (12)$$

En lógica difusa el Modus Ponens se extiende a lo que se llama Modus Ponens Generalizado y que puede resumirse de la siguiente forma:

Premisa 1: "u es A*".

Premisa 2: "SI u es A ENTONCES v es B".

Consecuencia: "v es B*".

En dónde el conjunto difuso A* no tiene por qué ser necesariamente el mismo que el conjunto difuso B que aparece en el consecuente de la regla.

Como vemos en lógica clásica una regla se ejecuta sólo si la primera premisa es exactamente la misma que el antecedente de la regla y el resultado de cada regla ejecutada es exacto al consecuente, en cambio en lógica difusa, una regla es ejecuta si existe un grado de similaridad distinto de cero entre la primera premisa y el antecedente de la regla y el resultado de la ejecución de la regla es un consecuente que tiene un grado de similaridad distinto de cero con el consecuente de la regla. Así pues el Modus Ponens generalizado es una composición difusa en la que la primera relación difusa es el conjunto difuso A* y que puede expresarse como en la ecuación 13:

$$\mu_{B^*}(x) = \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) \mu_{A \rightarrow B}(x, y)] \quad (13)$$

Teniendo en cuenta que, en las aplicaciones de la lógica difusa en la ingeniería la función característica de la implicación se construye con los operadores mínimos y producto, que además de ser los más simples conservan la relación causa-efecto, tendremos dos opciones a elegir correspondientes a las ecuaciones 14 y 15:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (14)$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (15)$$

2.3 Reglas difusas

Una regla difusa base es un conjunto de reglas SI-ENTONCES que pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$R^m : \text{Si } u_1 \text{ es } A_1^m \text{ y } u_2 \text{ es } A_2^m \text{ y } \dots \text{ y } u_p \text{ es } A_p^m \quad (16)$$

entonces v es B^m .

con $m = 1, 2, \dots, n$

y donde A_i^m y B^m son conjuntos difusos en $U_i \subset R$ (números reales) y $V \subset R$ respectivamente, $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ y $v \in V$, \mathbf{y} $x = x_1, x_2, \dots, x_n \in U$, \mathbf{y} $y \in V$ son los valores numéricos concretos de u y v , también respectivamente.

Vemos que esta regla tiene además la particularidad de que es un regla multi antecedente; este tipo de reglas, que combina varias variables en el antecedente, es el más utilizado en el diseño de sistemas difusos. Un sistema difuso estará formado por varias reglas difusas base con diferentes consecuentes, ya que una regla con multi antecedente y multi consecuente siempre podrá ser descompuesta en un conjunto de reglas base con multi antecedente pero un solo consecuente.

Existen dos caminos para obtener el conjunto de reglas correspondiente a un conjunto de datos numéricos:

- Dejar que los datos establezcan los conjuntos difusos que aparecen en los antecedentes y los consecuentes.
- Predefinir los conjuntos difusos para antecedentes y consecuentes y luego asociar los datos a esos conjuntos.

Para llegar a obtener el conjunto completo de reglas que modelan un problema se puede partir de considerar todas las combinaciones de reglas P que es posible establecer teóricamente, entre el número de antecedentes p y el número de conjuntos difusos de entrada A considerados para cada antecedente. Así, para cada consecuente, el número teórico de reglas posibles será:

$$P_i = \prod_n A_n \text{ para } n = 1 \dots p;$$

Sin embargo entre estas P reglas teóricamente posibles para cada consecuente, habrá algunas que no tengan sentido físico y otras que no se ajusten a las características del problema a resolver. Se deberá pues seleccionar, de entre todas las reglas posibles, el conjunto de reglas más adecuadas al problema que se considera (Passino, 1998).

2.4 Diagrama de bloques de un sistema basado en técnicas de lógica difusa.

El esquema de un sistema basado en técnicas de lógica difusa se presenta en la figura 2.1.



Figura. 2.1. Esquema general de un sistema basado en lógica difusa.

2.4.1 Fuzzificador

En este tipo de control se relaciona un valor medido x con un grado de pertenencia $\mu(x)$ llamado conjunto difuso, que consigue una nueva cuantificación de la variable x en términos de expresiones de lingüística (por ejemplo, Alto, Medio, Bajo). Por el momento para este estudio se consideran dos tipos de conjuntos difusos (Figura. 2.2).

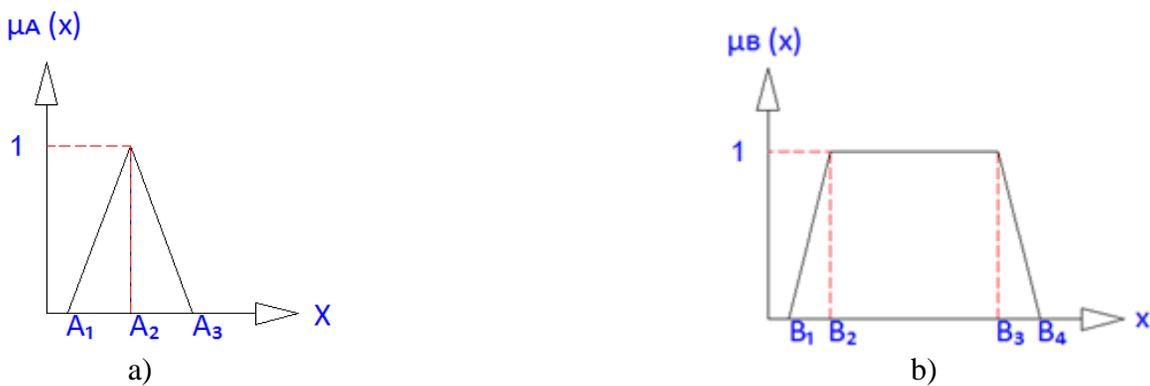


Figura. 2.2. Conjuntos difusos a considerar, a) Conjunto triangular y b) conjunto trapezoidal.

Las funciones de pertenencia $\mu(x)$ para estos conjuntos son los siguientes:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & x = A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_2 - A_1}, & A_1 < x < A_2; \\ 1 - \frac{|A_2 - x|}{A_3 - A_2}, & A_2 < x < A_3; \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & B_2 < x < B_3; \\ 1 - \frac{|B_2 - x|}{B_2 - B_1}, & B_1 < x < B_2; \\ 1 - \frac{|x - B_3|}{B_4 - B_3}, & B_3 < x < B_4; \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (18)$$

2.4.2 Bloque de inferencia.

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

2.4.3 Defuzzificador.

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

La salida del mecanismo de inferencia es un conjunto difuso resultante, para generar la salida numérica a partir de este conjunto existen varias opciones como el Centro de Gravedad, los Centros Promediados entre otros, figura 2.5. (Passino y Jantzen, 1998).

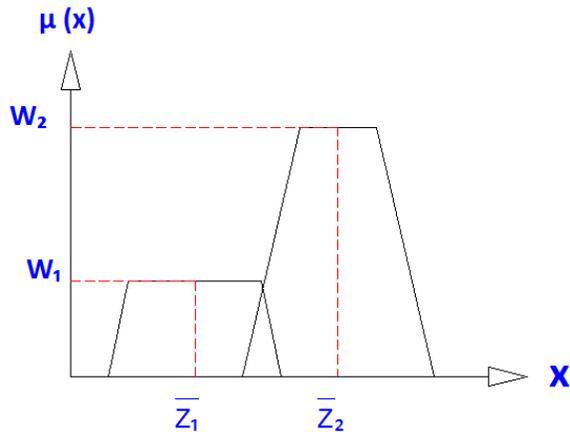


Figura 2.3. Defuzzificador de centros.

2.5 Mecanismos de inferencia

Los mecanismos de inferencia son aquellos en los que se usan los principios de la lógica difusa para realizar un mapeo de los conjuntos difusos de entrada a los conjuntos difusos de salida. Cada regla es interpretada como una implicación difusa. Es decir, el bloque de inferencia es aquel en el cual se realiza la “traducción matemática” de las reglas difusas: estas reglas modelan el sistema pero para poder trabajar con ellas y extraer un resultado se debe de evaluar matemáticamente la información que reflejan. Como ya se ha mencionado anteriormente, las reglas más utilizadas para diseñar un sistema basado en lógica difusa toman la forma:

"Si u_1 es A_1 y u_2 es A_2 y u_3 es A_3 entonces v es B "

Podemos decir que la implicación de cada regla (el conectivo lógico ENTONCES) es un conjunto difuso cuya función característica sería:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$$

donde $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$

Por lo tanto el control de lógica difusa se aplicará a los sistemas de gestión ambiental interior ofreciendo una ventaja significativamente en términos de conservación de energía y la satisfacción de los usuarios en los requerimientos de confort lumínico en interiores en comparación con los sistemas de control clásico (Kolokotsa, 2003).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Mediciones de campo

3.1.1 Características del edificio

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el edificio F planta alta de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro que se muestra en la Figura 3.1., Figura 3.2. y Figura 3.3.; estas figuras nos permite tener una referencia real del segundo piso en el edificio F en cuanto a las características de su fachada, su orientación y dimensionamiento.



Figura 3.1. Vista lateral suroriente del edificio F.



Figura 3.2. Vista satelital del edificio F.

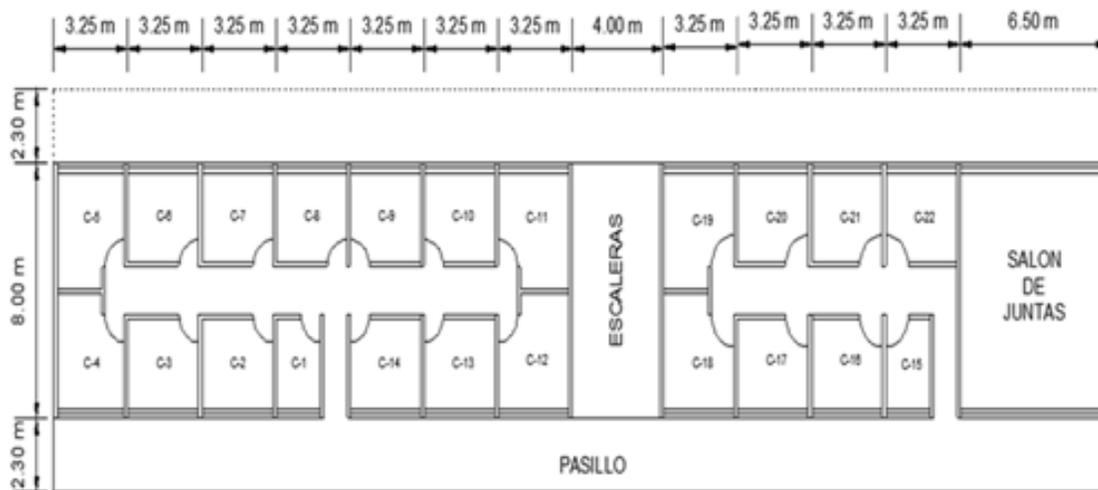


Figura 3.3. Planta alta del Edificio F.

3.1.2 Características de las oficinas

Las ventanas de las oficinas del edificio que dan hacia el exterior (noroeste y suroeste) cuentan con persianas de PVC tipo vertical, su apertura y cierre se controlan de forma manual; las ventanas que dan hacia el interior en el edificio cuentan con cortinas fijas de tela de color blanco. El sistema para la iluminación artificial al interior de las oficinas es implementado mediante lámparas de dos tubos

con una potencia de 32 watts por cada tubo, el sistema de encendido y apagado es controlado de forma manual por un apagador sencillo, la potencia consumida promedio por la lámpara es de 0.08 kWh Figura 3.4.

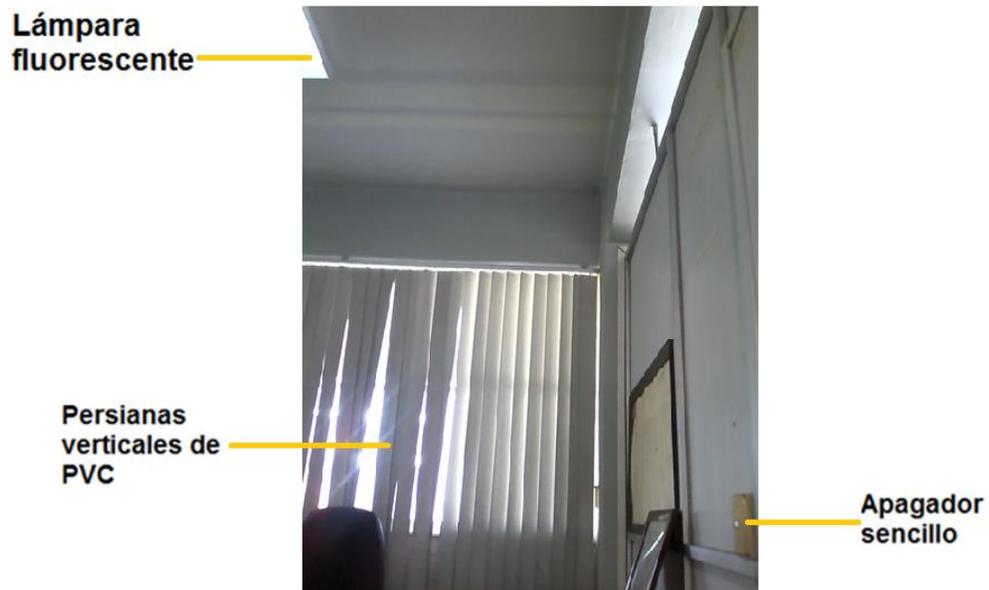


Figura 3.4. Características de las oficinas.

El estudio de investigación se realizó en la oficina C-9. La Figura 3.5. muestra una vista superior y de acuerdo a sus dimensiones el piso tiene un área total de 10.24 m².

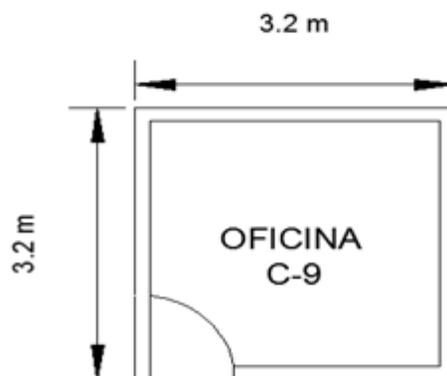


Figura 3.5. Vista superior de la oficina C-9.

Las lámparas fluorescentes con el fin de proporcionar iluminación artificial se encuentran a la misma altura del falso plafón de 2.5 m con respecto al piso, el diseño de la oficina incluye una ventana hacia el exterior de 2.9 m de largo x 1.5 m de altura, esta ventana tiene una orientación hacia el lado noroeste. Los muros divisorios de las oficinas están hechos de triplay blanco Figura 3.6.



Figura 3.6. Oficina C-9 vista lateral noroeste.

3.2 Consideraciones para determinar el confort lumínico

Para permitir que las personas realicen tareas visuales de modo eficiente y preciso, debe de preverse de una iluminación adecuada y apropiada. La iluminación puede ser proporcionada mediante luz natural, alumbrado artificial o una combinación de los mismos. Así de esta manera tenemos que el confort visual es cuando los trabajadores tienen una sensación de bienestar y de un modo indirecto también

contribuye a un elevado nivel de productividad. De acuerdo a la norma española UNE-EN 12464-1 en oficinas (escritura, lectura, tratamiento de datos) se debe de tener 500 lux que es el valor del cual no se permite que caiga la iluminancia medida en la superficie especificada.

3.3 Ubicación del plano de trabajo

Para conocer las lecturas de iluminación en el interior de la oficina, se tomó el escritorio como el plano de trabajo teniendo la siguiente localización con forme a una vista superior de la oficina C-9 y un punto de referencia cero se tiene que $A1(x_1=1.95 \text{ m}, y_1=2.45 \text{ m}, z_1=0.9 \text{ m})$, como se muestra en la figura 3.7.

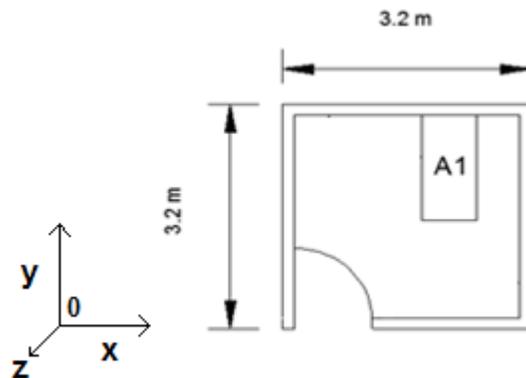


Figura 3.7. Identificación del plano de trabajo de la oficina C-9.

3.3.1 Lecturas en el plano de trabajo con persianas verticales de PVC y lámparas de 32W.

Se realizó un monitoreo en el plano de trabajo A1 de la oficina C-9 para saber el número de luxes disponibles y los resultados se muestran en la Figura 3.8., los casos que se grafican son, las persianas abiertas con la luz prendida y las persianas abiertas con la luz apagada.

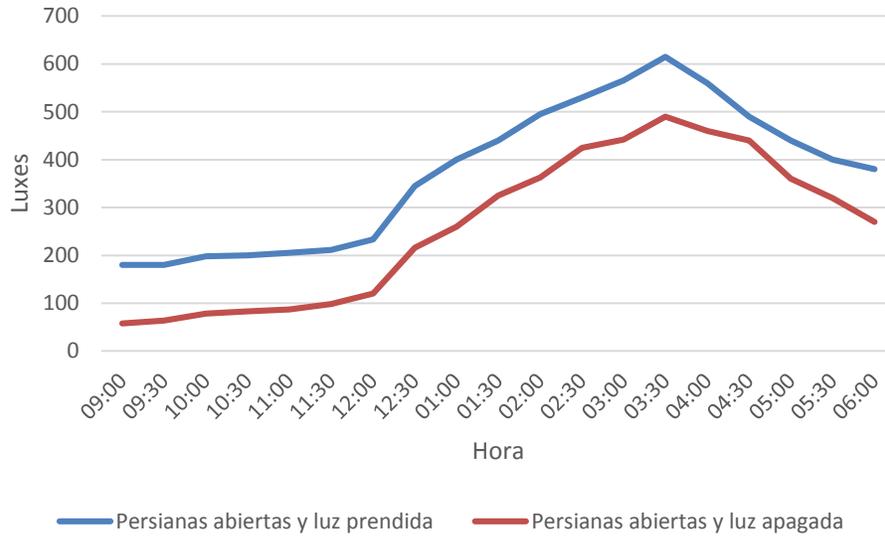


Figura 3.8. Número de luxes en el plano de trabajo A1 con persiana vertical de PVC.

3.3.2 Lecturas del número de lux en el plano de trabajo sin persianas.

También se cuantificó la iluminación natural sobre el plano de trabajo A1 en la oficina C-9 sin la persiana vertical de PVC y los resultados que se obtuvieron se muestran en la Figura 3.9.

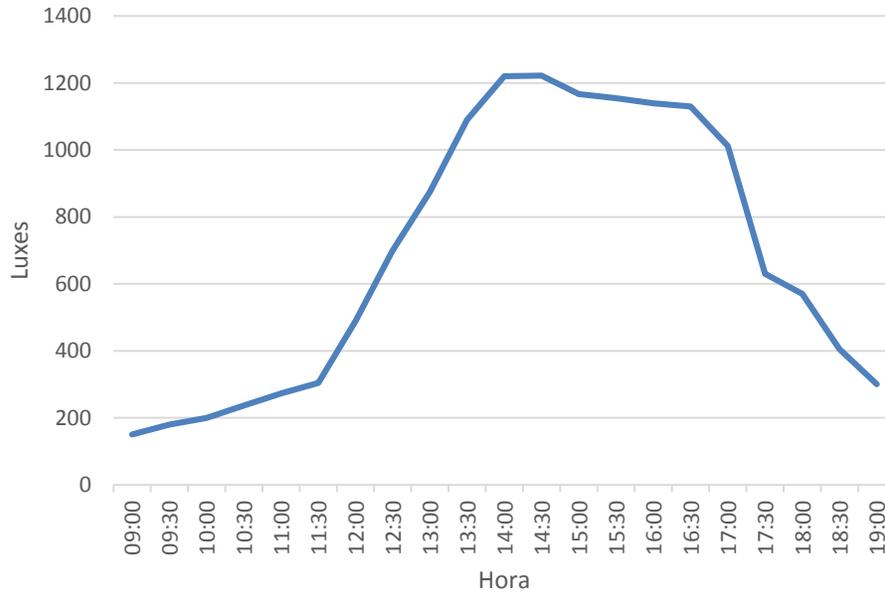


Figura 3.9. Número de luxes en el plano de trabajo A1 sin la persiana vertical de PVC.

En donde podemos observar que entre 12:00 y 12:30 horas del día hasta las 18:30 horas tenemos disponible la iluminación natural por encima de los 500 lux sobre el plano de trabajo A1.

3.4 Características y desarrollo de los elementos del sistema de iluminación.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó un Controlador Lógico programable “PLC” CompactLogix L23E Figura 3.10. (tiene 4 módulos, el primer módulo con 16 entradas digitales, el segundo módulo con 16 salidas digitales, el tercer módulo con 4 entradas analógicas en tensión, 4 entradas analógicas en corriente, 2 salidas analógicas en tensión, 2 salidas analógicas en corriente y el cuarto módulo tiene contadores rápidos).



Figura 3.10. Controlador Lógico Programable PLC.

El Controlador Lógico Programable (PLC) se alimentó con una fuente de 24 VCC. El módulo de entradas digitales trabajó con una tensión de 24 VCC. La **ENT.0** se utilizó para el micro switch inferior, la **ENT.1** para el micro switch superior y la **ENT.2** para el micro switch medio como se muestra en la Figura 3.11.

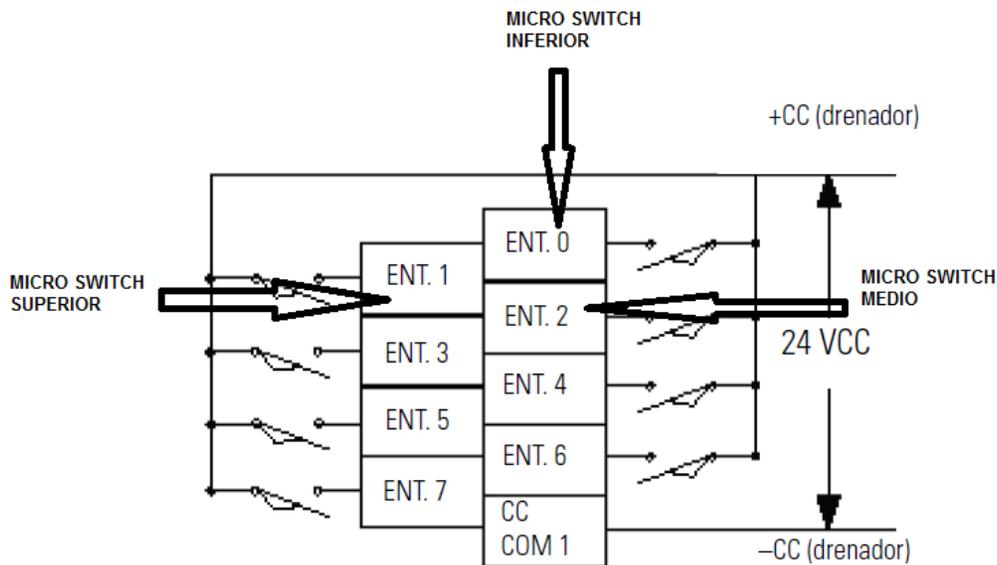


Figura 3.11. Cableado en el módulo de entradas digitales.

El módulo de salidas digitales se utilizó para el control remoto de la persiana motorizada enrollable; la terminal +VCC del PLC se alimentó con 12 VCC tomados del control remoto de la persiana motorizada, la **SAL.0** se envió para bajar la persiana, la **SAL.1** se envía para el paro de la persiana y la **SAL.2** para subir la persiana. Su cableado se muestra en la Figura 3.12.

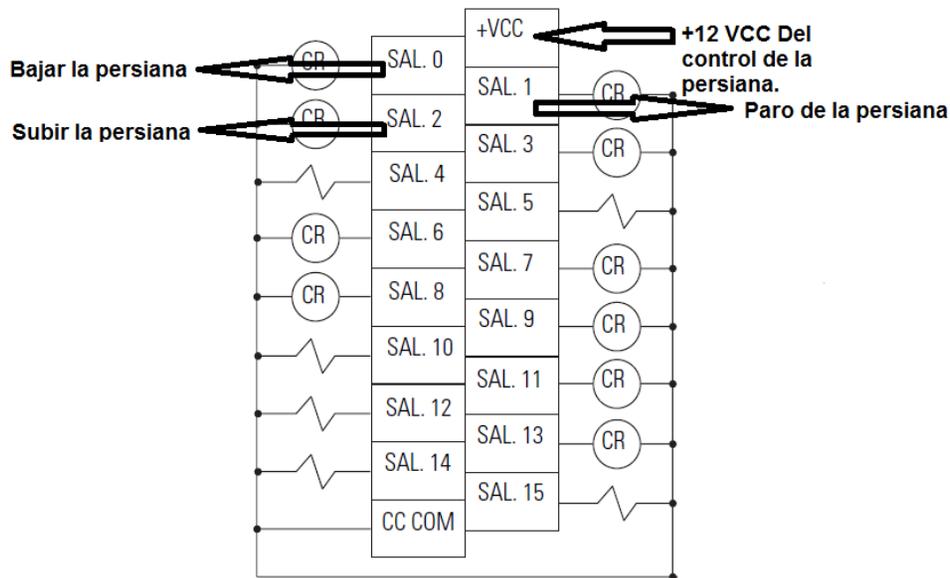


Figura 3.12. Cableado en el módulo de salidas digitales.

En el módulo de entradas y salidas analógicas; se utilizó una entrada analógica **in 0** para el sensor de iluminación exterior y una entrada analógica **in 1** para el sensor de iluminación interior. La salida analógica **out 1** se utilizó para la lámpara dimeable como se muestra en la Figura 3.13.

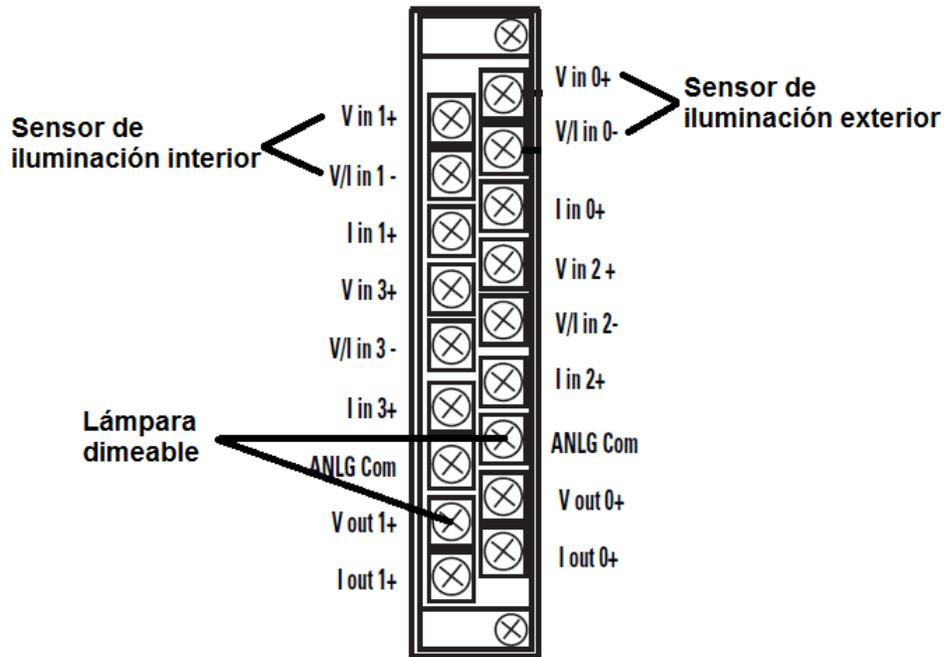


Figura 3.13. Cableado en el módulo de E/S analógicas.

Para la iluminación artificial en la oficina C-9 se utilizaron dos lámparas fluorescentes con balastro electrónico dimeables (0-10 volts) con un modelo de balastro QTP2X32T8/127 DIM-B marca Osram, cada tubo con una potencia de 32 Watts, Figura 3.14.



Figura 3.14. Lámparas fluorescentes de balastro dimeable.

En el control de la iluminación natural hacia el interior de la oficina C-9 se utilizó una persiana motorizada modelo Screen 550; para controlar la posición de la persiana motorizada abierta, a la mitad y cerrada se utilizaron tres micro switch Figura 3.15.

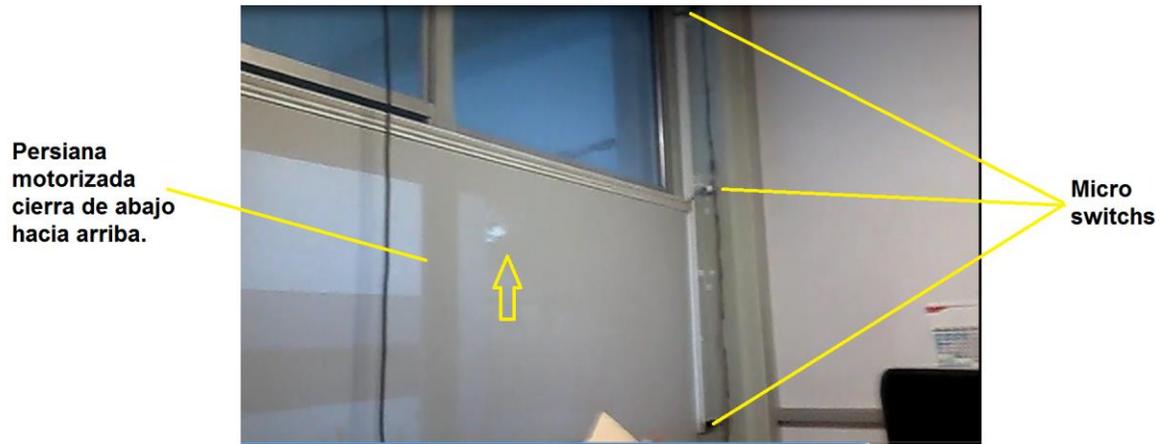


Figura 3.15. Persiana motorizada modelo Screen 550.

En la medición de las variables lumínicas internas y externas de la oficina C-9 se utilizaron dos sensores de luz ambiental SFH-5711 marca Osram, los cuales se instrumentaron para que trabajaran en un rango de 0 a 10 volts, Figura 3.13.

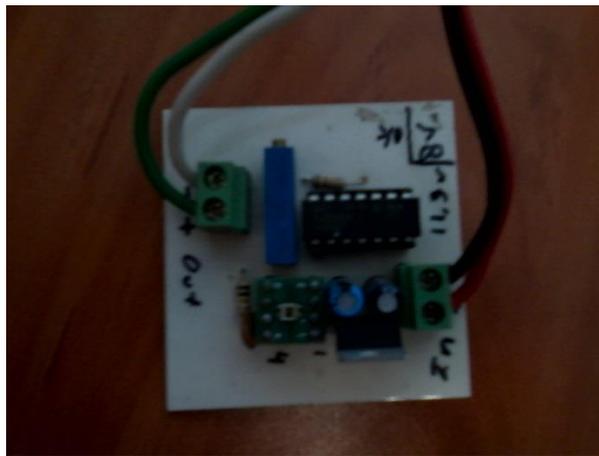


Figura 3.16. Sensor de iluminación SFH_5711.

Una forma esquemática de los diferentes componentes que se utilizaron en la oficina C.9 del edificio F se muestran en la Figura 3.17.

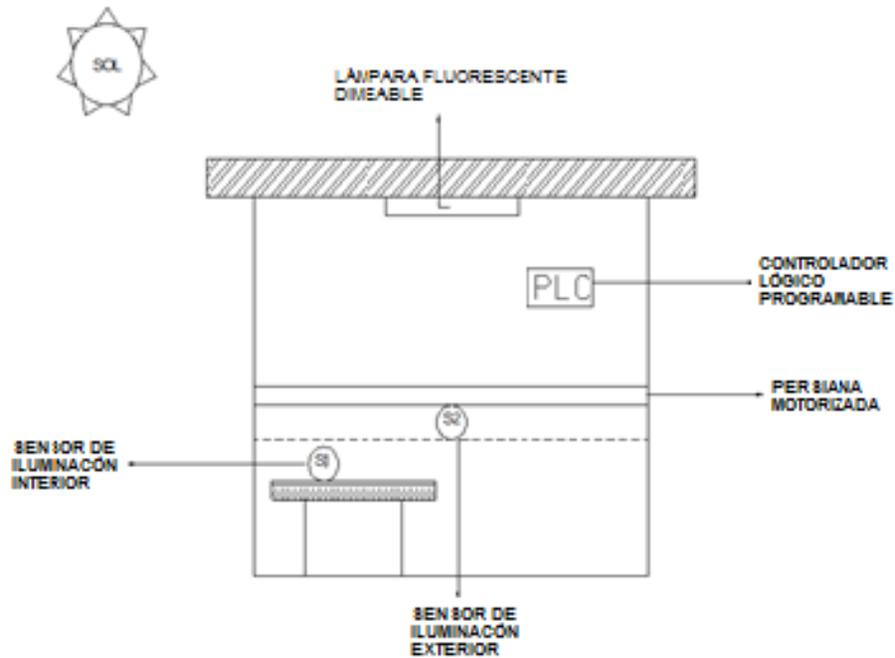


Figura 3.17. Elementos constitutivos del proyecto.

3.5 Desarrollo del algoritmo de la lógica difusa en el FuzzyDesigner

El desarrollo de las variables lingüísticas de entrada para el sensor exterior se plantea en base a las lecturas que se obtienen por un luxómetro y se plantean en la Figura 3.18.

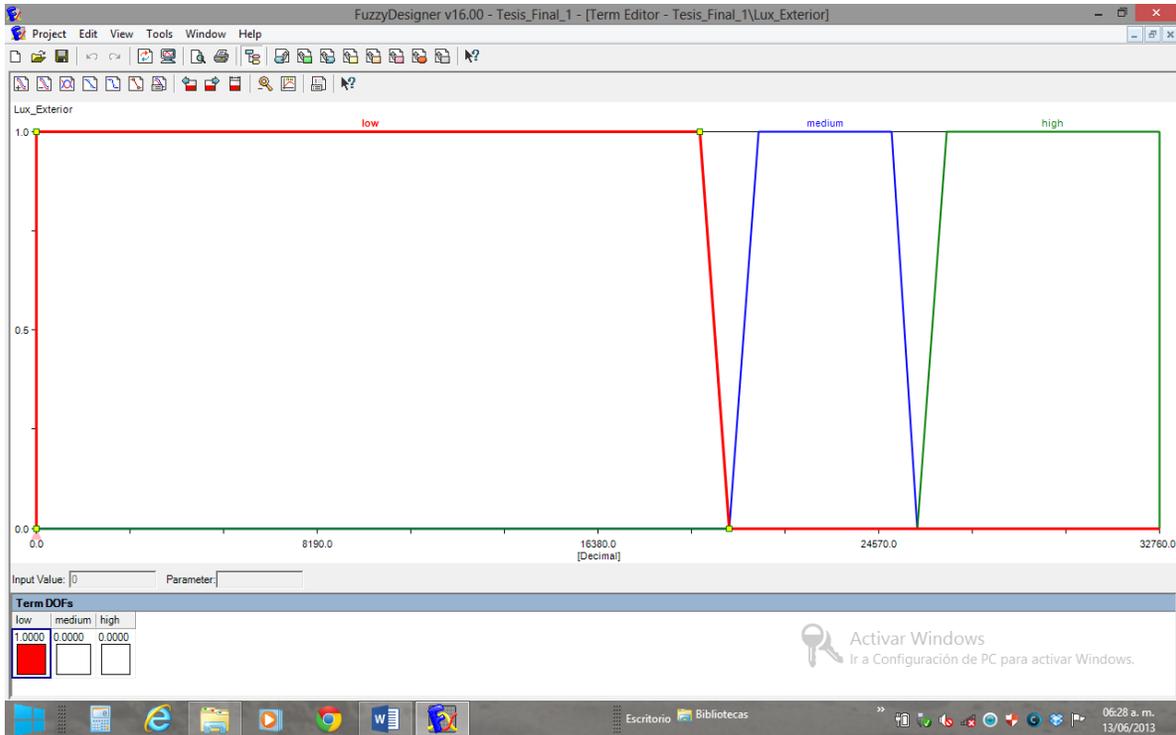


Figura 3.18. Variables lingüísticas de entrada para el sensor exterior.

Y para el sensor interior se plantean las siguientes variables lingüísticas de entrada que se muestran en la Figura 3.19.

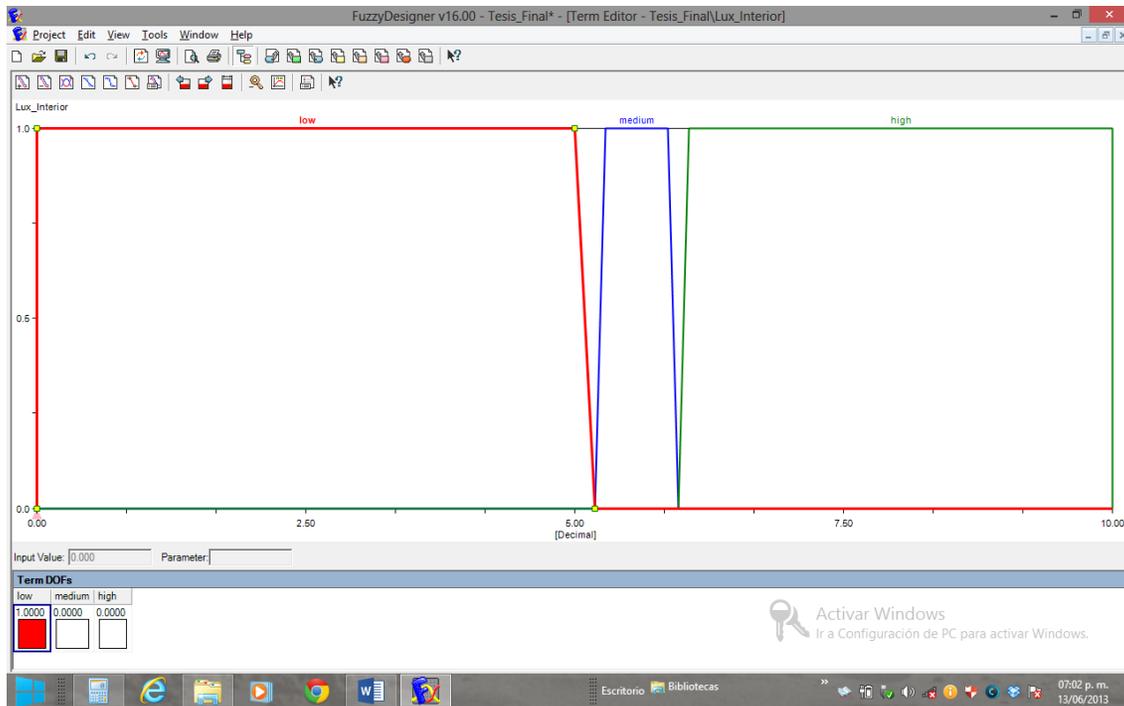


Figura 3.19. Variables lingüísticas de entrada para el sensor interior.

Las reglas difusas que se plantean para el sensor interior, sensor exterior y la lámpara dimeable son las siguientes:

Tabla 3.1. Tabla de reglas difusas para el sensor interior, sensor exterior y la lámpara dimeable.

1. IF (Lux_Interior IS low) AND (Lux_Exterior IS medium) THEN (Intencidad_Lampara IS V_5)
2. IF (Lux_Interior IS low) AND (Lux_Exterior IS low) THEN (Intencidad_Lampara IS V_10)
3. IF (Lux_Interior IS low) AND (Lux_Exterior IS high) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
4. IF (Lux_Interior IS medium) AND (Lux_Exterior IS medium) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
5. IF (Lux_Interior IS medium) AND (Lux_Exterior IS low) THEN (Intencidad_Lampara IS V_10)
6. IF (Lux_Interior IS medium) AND (Lux_Exterior IS high) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
7. IF (Lux_Interior IS high) AND (Lux_Exterior IS medium) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)
8. IF (Lux_Interior IS high) AND (Lux_Exterior IS low) THEN (Intencidad_Lampara IS V_10)
9. IF (Lux_Interior IS high) AND (Lux_Exterior IS high) THEN (Intencidad_Lampara IS V_0)

Y las reglas difusas que se plantean para el sensor exterior y la persiana motorizada son las siguientes:

Tabla 3.2. Tabla de reglas difusas para el sensor exterior y la persiana motorizada

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

También se plantean las variables Lingüísticas de salida para la persiana motorizada en base al monitoreo del número de lux sobre el plano de trabajo A1 Figura 3.20.

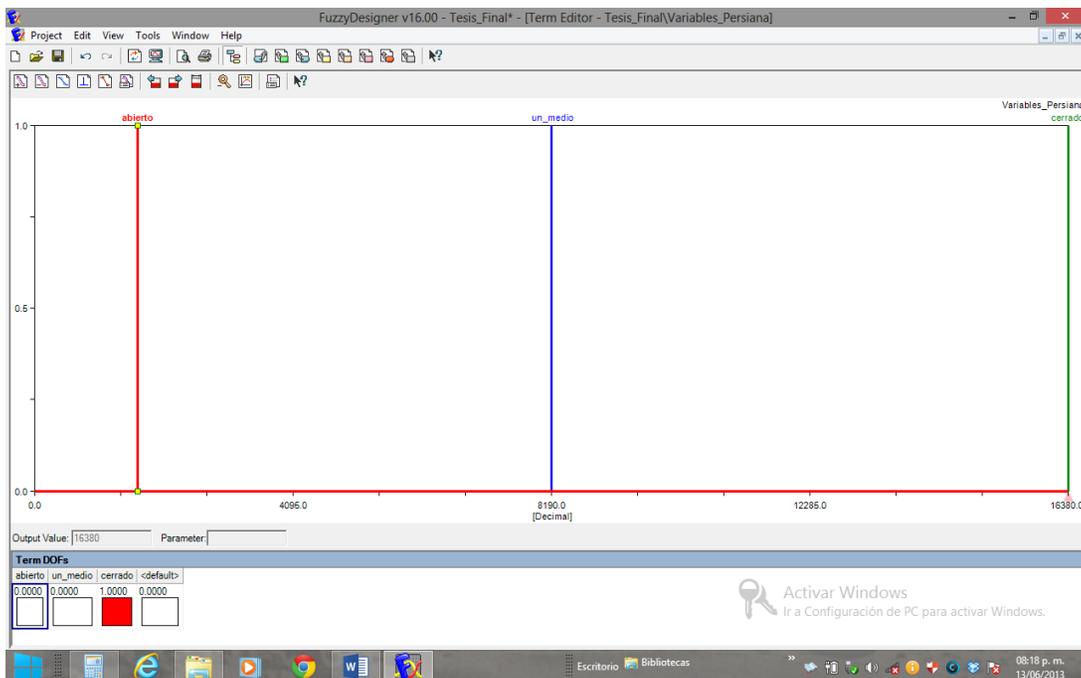


Figura 3.20. Variables lingüísticas para la persiana motorizada.

Y para las variables Lingüísticas de salida de la lámpara dimeable se muestran en la Figura 3.21.

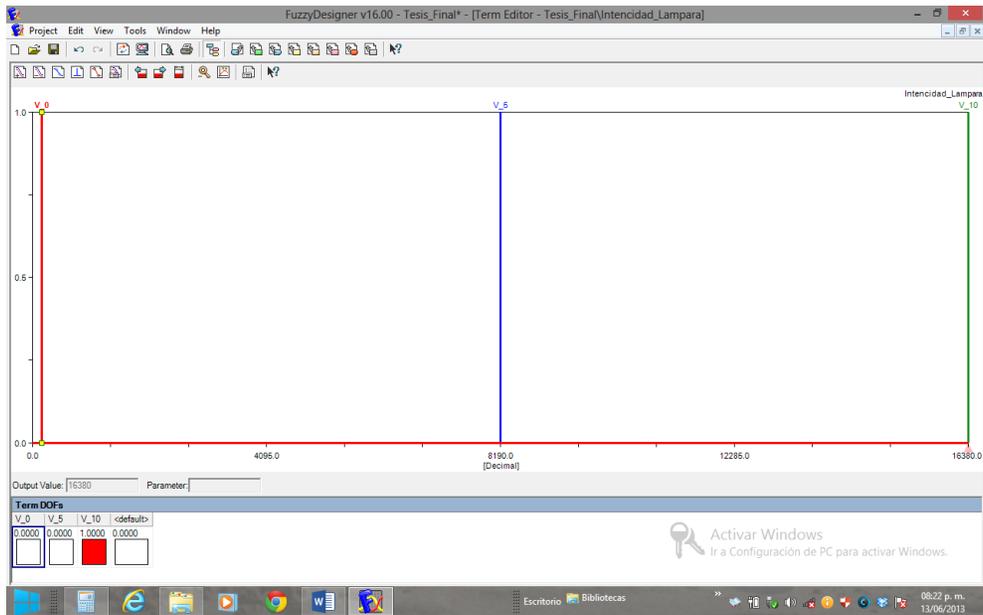


Figura 3.21. Variables lingüísticas para la lámpara dimeable.

3.6 Lógica borrosa en el controlador lógico programable RSLogix 5000.

Cuando se tuvo el algoritmo de control en el fuzzyDesigner se importó al RSLogix 5000 para obtener el diagrama en escalera, Figura 3.22.

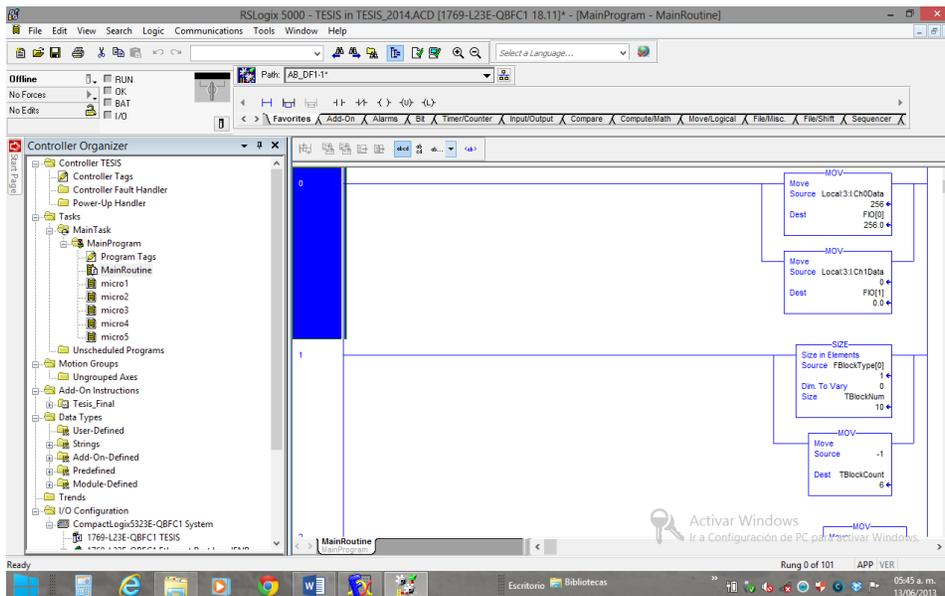


Figura 3.22. Diagrama en escalera del sistema inteligente.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Algoritmo ideal contra el real.

Durante el desarrollo se obtuvo un algoritmo de control inteligente ideal Figura 4.1., porque cuando se quiso implementar en el sistema real la persiana motorizada tomaba valores definidos de su carrera y por lo tanto solo debía de tomar tres valores.

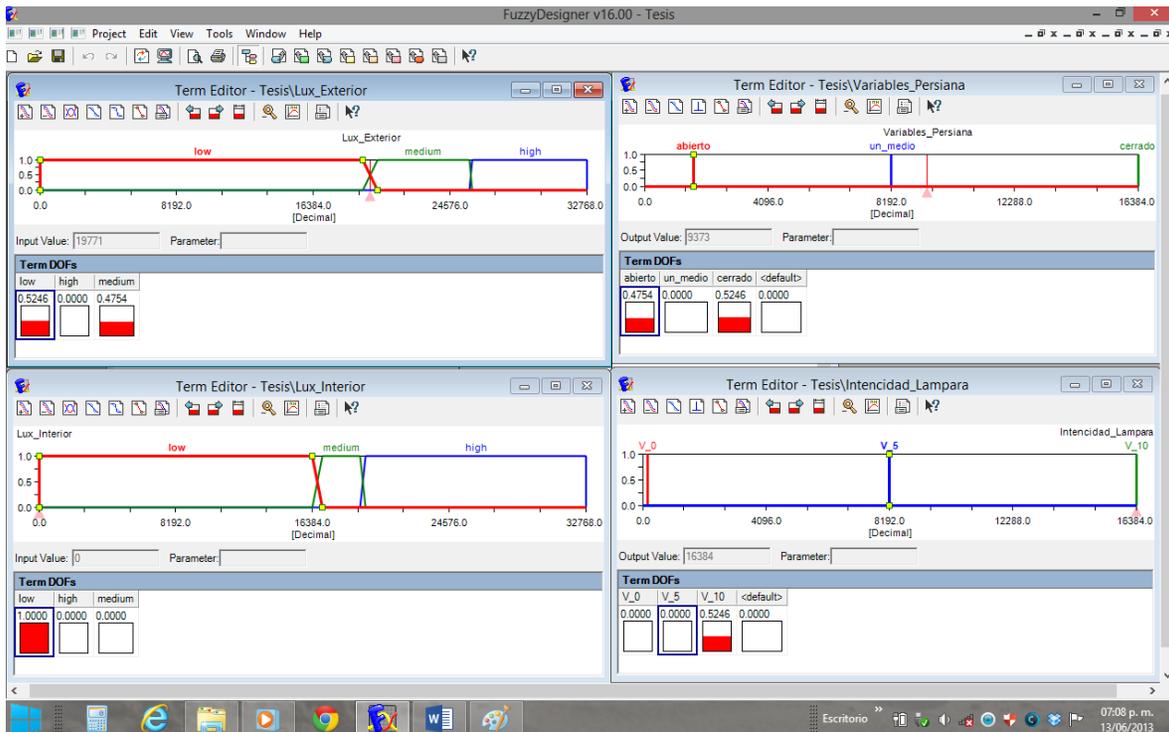


Figura 4.1. Algoritmo inteligente ideal.

Por lo que se tuvo que ajustar el algoritmo para su aplicación real como se muestra en la Figura 4.2.

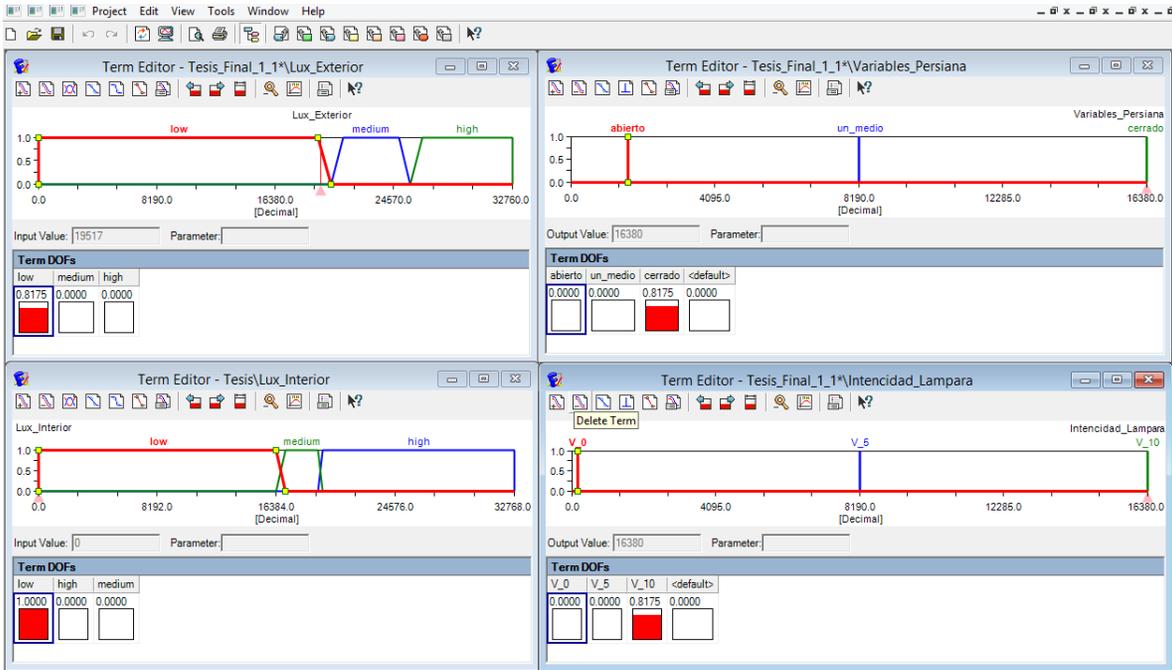


Figura 4.2. Algoritmo inteligente real.

La grafica en 3D que se obtuvo en el FuzzyDesigner del sistema inteligente se muestra en la Figura 4.3.

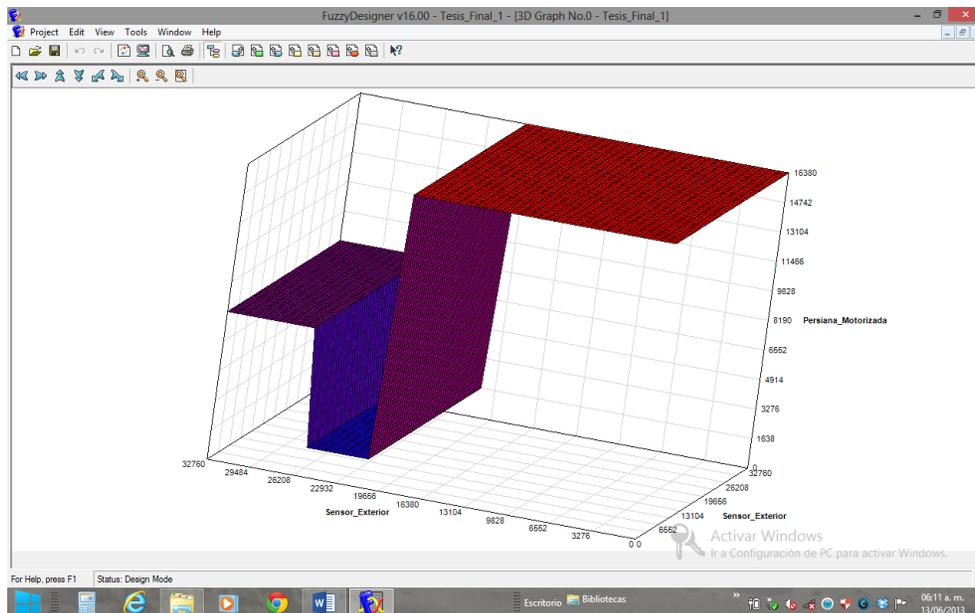


Figura 4.3. Grafica en 3D del sistema inteligente.

4.2 Ahorro energético del sistema inteligente.

La potencia consumida promedio por las lámparas fluorescentes instaladas en el edificio-F es de 0.08 kWh en cada oficina con una iluminación promedio en el plano de trabajo de 93 luxes. Y la potencia consumida por las lámparas dimeables que se utilizan en este proyecto en la oficina C-9 son de 0.112 kWh con una iluminación sobre el plano de trabajo de 480 luxes. En la Tabla 4.1. se puede observar a detalle la potencia real de consumo por la lámpara y el número de luxes sobre el plano de trabajo.

Tabla 4.1. Potencia real consumida y número de luxes con respecto al tipo de lámpara.

Tipo de lámpara	Potencia real consumida kWh	Número de Luxes en el plano de trabajo
2X32W	0.071	80
2X75W	0.107	105
F96T12.D.EX	0.112	480

Cabe mencionar que la altura de las lámparas en la oficina C-9 se encuentran a una altura de 2.5 m, mientras que en los demás cubículos se encuentran a una distancia promedio de 3 m.

Por lo anterior tenemos que una oficina normalmente trabaja en un promedio de 8 horas diarias entre las 9:00 a 17:00 horas, entonces la potencia consumida en una oficina sería de:

$$P_{8horas} = 0.08kWh * 8horas = 0.64kWh \quad (1)$$

Consultado la Figura. 3.9. vemos que a partir de las 12:00 horas podemos aprovechar la luz natural para tener 500 luxes sobre el plano de trabajo, haciendo esta consideración tendríamos la siguiente Figura 4.4., que representa la potencia

consumida monitoreada por un analizador de energía 434 marca Fluke, el cual nos da una potencia consumida de 0.409 kWh.

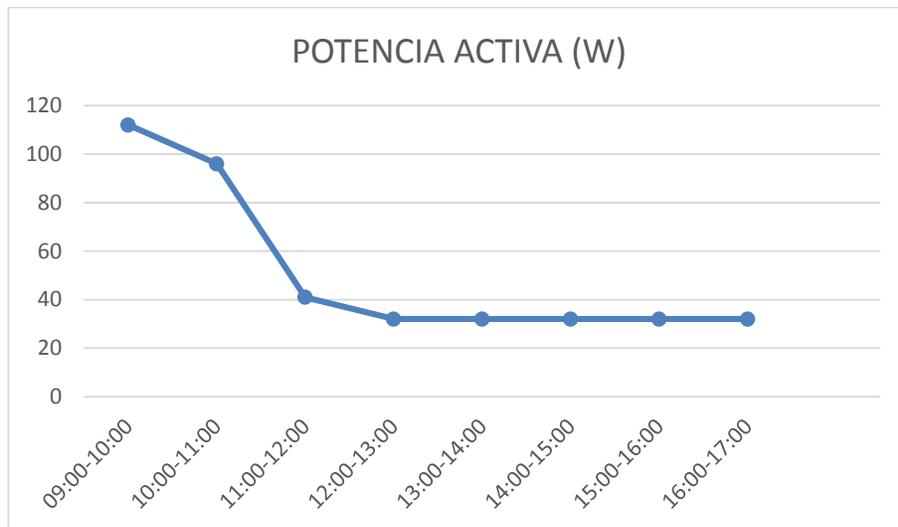


Figura 4.4. Potencia consumida por hora en la oficina C-9 con el sistema inteligente.

Como se puede observar el sistema inteligente implementado consume 0.409 kWh por lo que puede llegar ahorrar hasta 34% de energía eléctrica en un día despejado asegurando un confort de iluminación sobre el plano de trabajo. La figura 4.5 muestra el sistema real del control de lógica difusa.



Figura 4.5. Sistema real del controlador de lógica difusa.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

Con la realización de este proyecto se logró desarrollar el algoritmo de control inteligente para el confort de iluminación en el interior de una oficina pública de acuerdo a la norma UNE-EN 12464-1 realizando el ajuste del controlador tipo Mamdani. En primera instancia el controlador del sistema fue ideal, ya que cuando se trató de implementar en el sistema real, la persiana y la lámpara dimeable trabajan mucho para mantener las condiciones ideales, realizando el ajuste del sistema se obtuvo un ahorro hasta un 34 % de ahorro en energía eléctrica asegurando un confort de iluminación sobre el plano de trabajo, quedando abierta la posibilidad de mejorar el sistema en cuanto al control de la persiana motorizada y a los sensores de iluminación.

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

REFERENCIAS

- 1 Atif, M.R., Galasiu, A.D. Energy performance of daylight-linked automatic lighting control systems in large atrium spaces: report on two field-monitored case studies, *Energy and Buildings*, 35 (2003) 441-461.
- 2 Babuska, R. *Fuzzy Modeling for Control*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1998).
- 3 Bleeker NC. Bene'ts of energy efficient lighting. *Energy Engineering* 90 (1993) 6-13.
- 4 BS 8206-2. *Lighting for buildings—Part 2: Code of practice for daylighting*. British Standard; 1992.
- 5 Di Stefano J., *Energy Efficiency and the Environment: the Potential for Energy Efficient Lighting to Save Energy and Reduce Carbon Dioxide at Melbourne University, Australia*, *Energy* 25 (2000) 823-839.
- 6 Diedier, D., Henri P.E. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. New York: Academic Press, 1980.
- 7 Doulos, L., Tsangrassoulis, A., Topalis, F. Quantifying Energy Savings in Daylight Responsive Systems: The Role of Dimming Electronic Ballast, *Energy and Buildings* 40 (2008) 36-50.
- 8 *Energy end-use intensities in commercial buildings*. Energy Information Administration (EIA). U.S. Department of Energy, Washington, September 1994.
- 9 Ghisi, E., Tinker, J. A. An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings, *Building and Environment* 40 (2005) 51-61.

- 10 Kolokotsa, D. Comparison of the performance of fuzzy controllers for the management of the indoor environment, *Building and Environment* 38 (2003) 1439-450.
- 11 Kovacic, Z., Bogdan S. *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*. 2005.
- 12 Krüger, L.E., Paulo, H.T.Z. Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms. *Building and Environment* 39 (2004) 1055-1063.
- 13 Lew D.J., *Alternatives to Coal and Candles: Wind Power in China*, *Energy* 28 (2000) 271-286.
- 14 Markham, B. Estudio de los factores ambientales en bibliotecas públicas de Barcelona y su influencia en la percepción de los usuarios, Universidad de Princeton, 2010, 1-88.
- 15 Mateja, T. L., Borut, Z., Joze, P., Ales, K. Daylight illuminance control with fuzzy logic, *Solar Energy* 80 (2006) 307-321.
- 16 Midilli, A., Dincer, I. *Green Energy Strategies for Sustainable Development*, *Energy Policy* 34 (2006) 3623-3633.
- 17 Min, G.F., Mills E., Zhang Q. Energy-efficient lighting in China: problems and prospects. *Right Light Three, Third European Conference on Energy-Efficient Lighting. Proceedings. vol. I. Presented papers. England: (1995) 26-8.*
- 18 Mingfang, T. Solar control for buildings, *Building and Environment* 37 (2002) 659-664.
- 19 Nikolaou T., D. Kolokotsa., Stavrakakis, G. *Introduction to Intelligent Buildings*, 2005.

- 20 Norma española UNE-EN 12464-1, Octubre 2003.
- 21 Omer A.M., Energy, Environment and Sustainable Development, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12(Issue 9): 2265-2300, December 2008.
- 22 Osterhaus, W.K.E., Discomfort Glare Assessment and Prevention for Daylight Applications in Office Environments, Solar Energy 79 (2005) 140-158.
- 23 Passino K.M., and S. Yurkovich, Fuzzy Control. California: (An Imprint of Addison-Wesley Longman, 1998).
- 24 Programa Nacional de Combate ao Desperdicio de Energia Eléctrica (PROCEL) Handbook of energy savings in public and commercial buildings. 3ª Edicao, (1993) in Portuguese.
- 25 Secretaría de energía (SENER), Prospectiva 2008.
- 26 Sliepenbeek, W., Van B. L. Evaluation of stimev, the all-Dutch utility-sponsored lighting rebate programs. Right Light Three, Third European Conference on Energy-Efficient Lighting. England Proceedings I (1995) 247-254.
- 27 Syed F. S. F, Sia S. J. Sunlight control and daylight distribution analysis: the KOMTAR case study, Building and Environment 39 (2004) 713-717.
- 28 Wong, J.K.W., Li, H., Wang, S.W. Intelligent Building Research: a Review, Automation in Construction 14 (2005) 143-159.
- 29 Wong, P.W., Shimoda, Y., Nonaka, M. Inoue, M., Mizuno, M. Semi-Transparent PV: Thermal Performance, Power Generation, Daylight

Modelling and Energy Saving Potential in a Residential Application,
Renewable Energy 33 (2008) 1024-1036.

ANEXOS

A. ARTÍCULO PUBLICADO EN EL OCTAVO CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dr. Gilberto Herrera Ruiz *Rector*

Q.F.B. Magaly Elizabeth Aguilar Ortiz *Secretaria de Extensión Universitaria*

Dra. María Teresa García Besné *Directora de Difusión Cultural*

Dr. Aurelio Domínguez González *Director de la Facultad de Ingeniería*

C. José Luis de la Vega Romero *Coordinador de la Editorial Universitaria*

Diseño: L.A.V. Abel Cervantes Cortez

Edición: Dra. Adriana Medellín Gómez

D.R. © Universidad Autónoma de Querétaro

Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n Código Postal 76010, Querétaro, Qro., México

ISBN: 978-607-513-021-7

Primera Edición, Agosto 2012

Hecho en México

Made in Mexico

Una nueva propuesta para la selección automática de la herramienta en torno de CNC aplicando procesamiento de imágenes	268
Una revisión de técnicas de optimización para el ahorro de energía eléctrica en sistemas de iluminación	286
Unidad de pre-procesamiento en FPGA para giroscopio digital de tres ejes tipo MEMS ..	301
Sistema embebido para el desarrollo de un Servidor WEB para la colección y guardado de datos.....	313
Potenciales Evocados Auditivos de Estado Estable: una revisión	320
Biosistemas.....	327
A Review of methods for insect pest control in greenhouses	328
Application of gypsum (calcium sulfate dihydrate) to improve nutritional Characteristics in soils and plants (review).....	350
La Técnica del Fitomonitoreo	360
Comparación en los grados Brix y el ácido cítrico en 2 variedades de fresa mexicana, cultivadas con nutrición convencional y orgánica, bajo hidroponía	367
Control system environmental chambers and greenhouses	379
Efecto del nitrógeno en la calidad de la flor de liliun (<i>lilium spp.</i>).....	404
Efecto del peróxido de hidrógeno sobre la pungencia del chile habanero (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.), bajo condiciones de invernadero.....	413
Eficiencia de dos materiales para refrigeración evaporativa con aire forzado y su efecto sobre el microclima y un cultivo en un invernadero.....	425
Evaluación de actividad antimicrobiana de extractos metanólicos de timbe (<i>Acaciella angustissima</i> Mill.) contra <i>Sclerotium cepivorum</i> Berk.....	438
Measurement of moisture in the soil and its importance in agriculture (review).....	449
Medición de parámetros y características geométricas en especies de hojas mediante procesamiento de imágenes y redes neuronales	457
Microalgas y su potencial en México.....	466
Modelos matemáticos aplicados al crecimiento de peces	475
Segmentación de imágenes para el análisis de calidad en jitomates para Biosistemas.....	482