

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO CON APLICACIÓN AL AHORRO DE ENERGÍA EN CENTROS DE ESTUDIO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN DISEÑO,  
PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**HERNÁN VINICIO LARA PADILLA**

(hvlara@espe.edu.ec)

**Director: Ing. Msc. ÁLVARO AGUINAGA. PhD.**

(alvaro.aguinaga@epn.edu.ec)

**Quito, Mayo 2011**

## DECLARACIÓN

Yo, Hernán Vinicio Lara Padilla, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Hernán Vinicio Lara Padilla

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Hernán Vinicio Lara Padilla, bajo mi supervisión.

---

Ing. Msc. Álvaro Aguinaga. PhD

## **AGRADECIMIENTOS**

Estoy satisfecho con el misterio de la eternidad de la vida y con el conocimiento, el sentido, de la maravillosa estructura de la existencia. Con el humilde intento de comprender aunque más no sea una porción diminuta de la Razón que se manifiesta en la naturaleza. (A. E.)

## DEDICATORIA

A mis padres y mis maestros por enseñarme el amor al estudio.

Hernán

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 .....   | 1  |
| 1. SISTEMAS DE ILUMINACIÓN .....   | 1  |
| 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS .....  | 1  |
| 1.1.1 Espectro luminoso .....  | 1  |
| 1.1.2 Flujo luminoso.....  | 2  |
| 1.1.3 Rendimiento luminoso (Eficacia luminosa) .....                           | 2  |
| 1.1.4 Intensidad luminosa.....   | 3  |
| 1.1.5 Nivel de iluminación (Iluminancia) .....                                 | 3  |
| 1.1.6 Iluminancia promedio.....  | 4  |
| 1.1.7 Luminancia .....   | 4  |
| 1.1.8 Uniformidad .....  | 5  |
| 1.2 TIPOS DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN .....                                     | 7  |
| 1.2.1 Características generales de las lámparas.....                           | 7  |
| 1.2.2 Evolución de las lámparas eléctricas.....                                | 7  |
| 1.2.3 Lámparas incandescentes.....   | 8  |
| 1.2.4 Lámparas de descarga .....   | 9  |
| 1.2.5 Lámparas fluorescentes .....   | 10 |
| 1.2.6 Lámparas de vapor de mercurio de alta presión.....                       | 10 |
| 1.2.7 Lámparas con halogenuros metálicos .....                                 | 11 |
| 1.2.8 Lámparas de vapor de sodio a baja presión.....                           | 11 |
| 1.2.9 Lámparas de vapor de sodio a alta presión.....                           | 12 |
| 1.2.10 LEDs de luz blanca.....   | 13 |
| 1.3 CARACTERÍSTICAS ERGONÓMICAS DE ILUMINACIÓN PARA<br>CENTROS DE ESTUDIO..... | 17 |
| 1.3.1 Diseño de iluminación.....   | 17 |
| 1.3.2 Diseño de iluminación cuantitativo.....                                  | 17 |
| 1.3.3 Iluminación para el aprendizaje .....                                    | 18 |
| 1.3.4 Necesidades humanas de iluminación .....                                 | 18 |
| 1.3.5 El rol práctico del control de iluminación.....                          | 19 |
| 1.4 INFLUENCIA DE LA LEGISLACIÓN.....  | 23 |

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 2 .....  | 27 |
| 2. SISTEMAS BORROSOS .....  | 27 |
| 2.1 LÓGICA BORROSA.....   | 27 |
| 2.2 CONJUNTOS BORROSOS .....  | 27 |
| 2.3 FUNCIONES DE INCLUSIÓN DE CONJUNTOS BORROSOS .....                          | 29 |
| 2.3.1 Función tipo trapezoidal.....   | 30 |
| 2.3.2 Función tipo singleton.....   | 31 |
| 2.3.3 Función tipo triangular .....   | 31 |
| 2.3.4 Función tipo S.....   | 31 |
| 2.3.5 Función tipo $\pi$ .....  | 32 |
| 2.4 VARIABLE LINGÜÍSTICA .....  | 33 |
| 2.5 PARTICIONES BORROSAS.....   | 34 |
| 2.6 MEDIDAS BORROSAS.....   | 35 |
| 2.6.1 Borrosidad .....  | 35 |
| 2.6.2 Distancia entre dos conjuntos borrosos.....                               | 35 |
| 2.6.3 Similitud .....   | 36 |
| 2.6.4 Entropía borrosa .....  | 36 |
| 2.6.5 Agrupamiento borroso (clustering).....                                    | 36 |
| 2.7 OPERACIONES BORROSAS.....   | 37 |
| 2.8 INFERENCIA BORROSA.....   | 38 |
| 2.8.1 Principio de extensión.....   | 39 |
| 2.8.2 Relación borrosa.....   | 39 |
| 2.8.3 <i>Modus Ponens</i> Generalizado y <i>Modus Tolens</i> Generalizado ..... | 40 |
| 2.8.4 Implicación borrosa.....  | 40 |
| 2.9 REGLAS BORROSAS .....   | 41 |
| 2.10 DISPOSITIVOS DE INFERENCIA BORROSA .....                                   | 43 |
| 2.11 FUSIFICACIÓN.....  | 44 |
| 2.11.1 Fuzificación singleton .....   | 44 |
| 2.11.2 Fuzificación no singleton .....  | 45 |
| 2.12 DEFUSIFICACIÓN .....   | 45 |
| 2.12.1 Defusificación por máximo.....   | 45 |
| 2.12.2 Defusificación por media de centros.....                                 | 46 |
| 2.12.3 Defusificación por centro de área .....                                  | 46 |

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| 2.13             | DESARROLLO DE SISTEMAS BORROSOS .....   | 47 |
| 2.13.1           | Eficiencia computacional .....  | 47 |
| 2.13.2           | Facilidad de adaptación .....   | 47 |
| 2.13.3           | Opciones más habituales en el desarrollo de sistemas borrosos .....               | 48 |
| 2.14             | BORROSIDAD Y PROBABILIDAD .....   | 49 |
| 2.15             | SISTEMAS DE CONTROL BORROSO .....   | 50 |
| 2.15.1           | Introducción al control borroso.....  | 50 |
| 2.16             | CONTROL PID VS CONTROL DIFUSO .....   | 51 |
| 2.17             | DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO .....  | 57 |
| 2.18             | DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL.....   | 60 |
| 2.18.1           | Introducción de ganancias de ajuste .....   | 61 |
| CAPÍTULO 3 ..... |   | 63 |
| 3.               | DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO .....  | 63 |
| 3.1              | ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN EN CENTROS DE ESTUDIO .....                               | 63 |
| 3.2              | DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....  | 63 |
| 3.2.1            | Sensores de luz.....  | 65 |
| 3.2.2            | Acondicionamiento .....   | 66 |
| 3.2.3            | Microcontrolador .....  | 68 |
| 3.2.4            | Preactuadores .....   | 70 |
| 3.2.5            | Actuadores o elementos finales de control .....                                   | 71 |
| 3.3              | CONTROL DIRECTO O LAZO ABIERTO.....   | 71 |
| 3.3.1            | Reglas difusas .....  | 75 |
| 3.3.2            | Mecanismo de inferencia.....  | 77 |
| 3.3.3            | Método de defusificación .....  | 77 |
| 3.4              | DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO EN LAZO CERRADO .....                               | 77 |
| CAPÍTULO 4 ..... |   | 84 |
| 4.               | IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS .....  | 84 |
| 4.1              | IMPLEMENTACIÓN.....   | 84 |
| 4.2              | PRUEBAS DEL SISTEMA .....   | 87 |
| 4.3              | ANÁLISIS DE RESULTADOS.....   | 90 |
| 4.3.1            | Comportamiento del sistema en lazo abierto.....                                   | 90 |
| 4.3.2            | Comportamiento del sistema en lazo cerrado y comparación con un control PID ..... | 91 |



|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 5 .....                        | 94 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... | 94 |
| 5.1 CONCLUSIONES.....                   | 94 |
| 5.2 RECOMENDACIONES .....               | 96 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                      | 97 |
| ANEXOS .....                            | 98 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabla 1. 1 | Magnitudes empleadas en sistemas de iluminación .....  | 6  |
| Tabla 1. 2 | Comparación de costos para alternativas de balastro para lámparas fluorescentes de 230 V de alimentación. Para el cálculo se ha asumido un costo de \$0.12 por kWh. El sistema de control para el balastro podría variar, en este ejemplo se asume un uso efectivo.... | 22 |
| Tabla 1. 3 | Niveles mínimos de iluminación requeridos para edificios y actividades en los mismos. ....   | 25 |
| Tabla 1. 4 | Referencias de iluminancia para centros de estudio. ....   | 26 |
| Tabla 2. 1 | Características de un sistema de 2do orden .....   | 56 |
| Tabla 3. 1 | Funciones de pertenencia para la variable <i>Sensor</i> .....  | 73 |
| Tabla 3. 2 | Salida para controlar la lámpara LED .....   | 74 |
| Tabla 3. 3 | Salida para controlar la opacidad del local .....  | 75 |
| Tabla 3. 4 | Tabla de inferencia difusa.....  | 76 |
| Tabla 3. 5 | Especificaciones para el sistema de inferencia borrosa .....   | 80 |
| Tabla 3. 6 | Funciones de membresía para el controlador difuso con retroalimentación.....   | 81 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figura 1. 1  | Clasificación del espectro de luz.....  | 1  |
| Figura 1. 2  | Flujo luminoso.....   | 2  |
| Figura 1. 3  | Concepto de intensidad luminosa.....  | 3  |
| Figura 1. 4  | Nivel de iluminancia.....   | 4  |
| Figura 1. 5  | Luminancia de una superficie .....  | 5  |
| Figura 1. 6  | Lámpara de descarga.....  | 9  |
| Figura 1. 7  | Lámpara fluorescente .....  | 10 |
| Figura 1. 8  | Lámpara de vapor de mercurio.....   | 11 |
| Figura 1. 9  | Lámpara con halogenuros metálicos .....   | 12 |
| Figura 1. 10 | Lámparas de vapor de sodio a bajo presión.....  | 12 |
| Figura 1. 11 | Lámpara de vapor de sodio a alta presión .....  | 13 |
| Figura 1. 12 | Lámpara LED .....   | 14 |
| Figura 1. 13 | Visión esquemática de un LED de luz blanca .....  | 14 |
| Figura1. 14  | Relación entre la intensidad y el voltaje para diodos de la casa<br><i>Nichia</i> .....             | 15 |
| Figura 1. 15 | Diagrama para determinar la recuperación de la inversión para<br>diferentes tipos de balastro. .... | 23 |
| Figura 2. 1  | Ejemplo de un conjunto borroso para la variable estatura.....                                       | 28 |
| Figura 2. 2  | Términos relativos a los conjuntos borrosos.....  | 29 |
| Figura 2. 3  | Función trapezoidal .....   | 30 |
| Figura 2. 4  | Función tipo singleton.....   | 31 |
| Figura 2. 5  | Función tipo sigmoïdal o S.....   | 32 |
| Figura 2. 6  | Función tipo $\pi$ .....  | 33 |
| Figura 2. 7  | Particiones borrosas para la variable estatura.....   | 35 |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figura 2. 8  | Lazo de control difuso.....  | 50 |
| Figura 2. 9  | Control PID vs control Borroso .....   | 54 |
| Figura 2. 10 | Control PID de tiempo-continuo .....   | 55 |
| Figura 2. 11 | Características de un sistema de 2do orden .....                                       | 56 |
| Figura 2. 12 | Control directo .....  | 58 |
| Figura 2. 13 | <i>Feedforward</i> control.....  | 59 |
| Figura 2. 14 | Parámetros difusos para control adaptivo .....   | 59 |
| Figura 2. 15 | Diagrama de control difuso.....  | 61 |
| Figura 2. 16 | Diagrama de control difuso modificado.. .....  | 61 |
| Figura 2. 17 | Diagrama de control difuso con ganancias.....  | 62 |
| Figura 3. 1  | Bloque de aulas construido por el DINSE.....   | 63 |
| Figura 3. 2  | Diagrama de bloques para el sistema de control de iluminación<br>propuesto .....       | 64 |
| Figura 3. 3  | Fotoresistencia ( <i>Light-dependent resistor, LDR</i> ) .....                         | 65 |
| Figura 3. 4  | Circuito de acondicionamiento para la LDR.....   | 67 |
| Figura 3. 5  | Relación voltaje de salida versus bits transmitidos.....                               | 68 |
| Figura 3. 6  | Circuito convertidor a señal digital mediante un <i>trigger Schmitt</i> . .....        | 68 |
| Figura 3. 7  | Microcontrolador PIC 16F877A.....  | 69 |
| Figura 3. 8  | Conexión de oscilador (X1) y Reset (MCLR).....   | 70 |
| Figura 3. 9  | LEDs como elementos final de control para alcanzar el nivel de luz<br>adecuado.....    | 71 |
| Figura 3. 10 | Sensor será la entrada del sensor de intensidad luminosa. ....                         | 72 |
| Figura 3. 11 | Funciones de pertenencia para la entrada <i>Sensor</i> .....                           | 73 |
| Figura 3. 12 | Funciones de pertenencia para salida <i>IntLed</i> (control de la lámpara<br>LED)..... | 74 |
| Figura 3. 13 | Funciones de pertenencia para salida <i>ServoPer</i> (control de<br>opacidad) .....    | 75 |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figura 3. 14 | <i>Rule Editor</i> .....   | 76 |
| Figura 3. 17 | Diagrama de control difuso con retroalimentación. ....   | 79 |
| Figura 3. 18 | Diagrama de bloques del controlador difuso .....   | 80 |
| Figura 3. 19 | Funciones de pertenencia. ....   | 82 |
| Figura 3. 20 | <i>Rule viewer</i> .....   | 83 |
| Figura 3. 21 | Superficie de control difusa .....   | 83 |
| Figura 4. 1  | Esquema de conexión de los elementos para el prototipo de control.....                                   | 86 |
| Figura 4. 2  | Circuito de prueba para el prototipo de control difuso .....   | 87 |
| Figura 4. 3  | Prototipo terminado .....  | 87 |
| Figura 4. 4. | Programa Light_Fuzzy_Panel. Fuente: Propia.....  | 89 |
| Figura 4. 5  | Modelo de control difuso directo diagramado en Simulink para el estudio del comportamiento dinámico..... | 90 |
| Figura 4. 6  | Respuesta dinámica de un controlador difuso directo. ....  | 91 |
| Figura 4. 7  | Diagrama control PID vs Control Difuso.....  | 92 |
| Figura 4. 8  | Respuesta dinámica control PI versus Controlador Difuso .....  | 92 |

## RESUMEN

El presente proyecto de Tesis tiene el objetivo fundamental de establecer una metodología de diseño de controladores difusos, lo más general posible, aplicado al desarrollo de un control de iluminación que pueda emplearse en sistemas de ahorro energético. De igual forma, se desea contribuir a la formalización de los sistemas difusos con herramientas que permitan el análisis de sistemas según la teoría de la inteligencia computacional. Para ello la memoria se ha organizado en cinco capítulos, cuyo contenido se resume a continuación:

En el *capítulo 1* se describen los sistemas de iluminación, que servirán como punto de partida para conocer el sistema que se quiere controlar mediante lógica difusa.

En el *capítulo 2* se plantea un marco teórico de la lógica difusa o borrosa y sus aplicaciones, realizando hincapié en las aplicaciones de control.

En el *capítulo 3* se afronta la necesidad de plantear una metodología de diseño para un controlador difuso, a través de un enfoque heurístico, a partir del conocimiento experto. También se afronta la necesidad de obtener un modelo de la planta para poder estudiar el sistema de manera formal desde el punto de vista de lógica borrosa.

En el *capítulo 4* se detalla la implementación del controlador difuso, así como la comparación con un controlador tipo PID a través de simulación del comportamiento dinámico de ambos sistemas.

Finalmente se desarrollan las conclusiones que se derivan de la Tesis y se esbozan los temas que dejan el camino abierto para ser resueltos en trabajos futuros.

## PRESENTACIÓN

Los sistemas de cómputo actuales presentan problemas al abordar tareas del mundo real, donde la información es masiva, redundante e imprecisa. Por ello desde hace unos años, se vienen proponiendo nuevos modelos de procesamiento inspirados en las soluciones encontradas por la naturaleza durante millones de años de evolución, que podrían ayudar a resolver importantes problemas tecnológicos como los de visión, habla, control e inteligencia artificial.

De entre estos nuevos modelos destacan los sistemas borrosos o difusos (*fuzzy*) que emulan el razonamiento aproximado de nuestro cerebro, permitiendo manejar conceptos vagos e imprecisos como los empleados en la vida cotidiana. Esta metodología junto a otras como redes neuronales y algoritmos genéticos, se enmarcan en la denominada inteligencia computacional (*soft computing*).

La lógica difusa es básicamente una lógica multievaluada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones convencionales como sí/no, verdadero/falso, negro/blanco, etc. Las nociones como "más bien caliente" o "poco frío" pueden formularse matemáticamente y ser procesados por computadoras. De esta forma se ha realizado un intento de aplicar una forma más humana de pensar en la programación de computadoras. La lógica difusa se inició en 1965 por Lotfi A. Zadeh, profesor de ciencia de computadoras en la Universidad de California en Berkeley. [9]

En esencia un controlador lógico difuso, contiene un algoritmo que es capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una estrategia de control automático. Con la lógica difusa se pueden diseñar aplicaciones para que las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior, con lo que se busca imitar el comportamiento humano. La creación de una máquina con lógica difusa, es forjar un sistema inteligente, en donde el comportamiento de la máquina, va a estar basado totalmente en el conocimiento del especialista o de la persona que aporta sus conocimientos empíricos para el funcionamiento de ésta. El conocimiento del experto es el

conocimiento empírico de cómo controlar el fenómeno, sin conocer ningún modelo del sistema a controlar.

La iluminación es la segunda fuente de consumo de energía eléctrica en la mayoría de los edificios. Con la Automatización y Control de la iluminación se trata de conseguir el máximo confort, con el mínimo consumo de energía posible. La necesidad de luz en una se decide a base a ciertos criterios como la actividad que se esta realizando, por ejemplo en un salón puede ser deseable aprovechar toda la potencia de la iluminación al estar lleno de gente, mientras el la misma estancia solo se desea 25% de la capacidad de la misma iluminación al ver una presentación. Y cuando no este nadie la necesidad de luz es cero.

La aplicación de controladores difusos a sistemas lineales ha sido tratada por diferentes autores, sin embargo sistemas no lineales y multivariables como una planta de iluminación han sido tratados con controladores tipo *on/off* o reguladores tipo *dimmers*, permitiendo sólo el confort, mas no enfocándose en el ahorro energético. Mediante el control difuso se plantea un modo de control que pueda abarcar ambos conceptos mediante un diseño heurístico.

El Ingeniero Mecánico debe ser capaz de manejar la electrónica industrial, lenguaje de programación y sistemas de control aplicado para modelar, diseñar, programar e instalar circuitos de mando y control automático de máquinas así como procesos industriales, con el fin de garantizar la optimización del rendimiento de los medios productivos.

El prototipo construido será de gran utilidad para las futuras generaciones que deseen enfocarse a las teorías de control basados en lógica difusa. En el programa es factible modificar los sistemas de inferencia difusa para ir haciendo las pruebas que consideren pertinentes.



# CAPÍTULO 1

## SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

### 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS [1]

#### 1.1.1 Espectro luminoso

La luz es la energía radiante que produce una sensación visual. Según su capacidad y ciertas propiedades. La luz visible está ubicada en el espectro luminoso entre las radiaciones ultravioleta e infrarroja, comprendida entre los límites de longitud de onda entre 380 nm y 760 nm. La primera corresponde al color violeta y la segunda al color rojo.

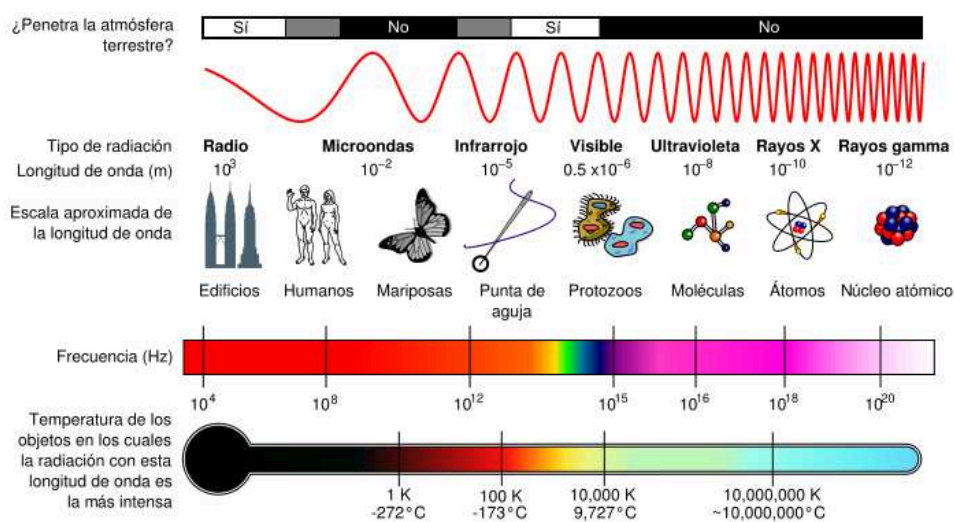


Figura 1. 1 Clasificación del espectro de luz. [1]

En la tecnología de iluminación algunos términos técnicos son usados para describir las propiedades de las fuentes de luz y los efectos que estos producen.

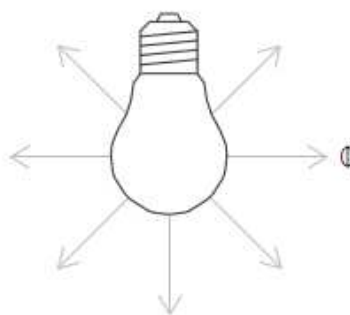
### 1.1.2 Flujo luminoso

Se define como la cantidad de energía luminosa emitida por una fuente de luz por unidad de tiempo en todas las direcciones. Se presenta por la letra griega  $\Phi$  y su unidad es el lumen ( $lm$ ). Su expresión viene dada por:

$$\Phi_L = \frac{dQ_L}{dt} \quad lm \quad (1.1)$$

donde:  $\Phi_L =$  flujo luminoso [ $lm$ ]

$\frac{dQ_L}{dt} =$  cantidad de energía luminosa radiada por unidad de tiempo



**Figura 1. 2** Flujo luminoso. [1]

### 1.1.3 Rendimiento luminoso (Eficacia luminosa)

Indica el flujo luminoso que emite una fuente de luz por cada unidad de potencia eléctrica consumida para su obtención. Se presenta por la letra griega  $\epsilon$  y su unidad es el *lumen/vatio* ( $lm/W$ ). La expresión de la eficacia luminosa viene dada por:

$$\epsilon = \frac{\Phi_L}{P} \quad \frac{lm}{W} \quad (1.2)$$

donde:  $\epsilon =$  eficacia luminosa

$P =$  potencia activa [ $W$ ]

### 1.1.4 Intensidad luminosa

Se define como la relación entre el flujo luminoso emitido por una fuente de luz en una dirección por unidad de ángulo sólido en esa misma dirección, medido en estereorradianes (*sr*). Siendo éste el ángulo formado entre el centro de una esfera de radio unitario y una porción de superficie de una unidad cuadrada de dicha esfera.

$$I = \frac{\Phi_L}{\omega} \quad cd = \frac{lm}{sr} \quad (1.3)$$

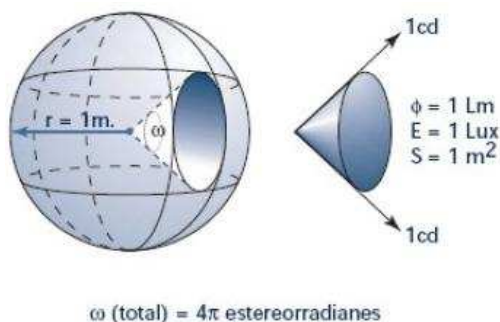
$$\omega = \frac{S}{r^2} \quad [sr]$$

donde:  $I$  = intensidad luminosa [*cd*]

$\Phi_L$  = flujo luminoso [*lm*]

$\omega$  = ángulo sólido [*sr*]

$r$  = radio de proyección [*m*]



**Figura 1.3** Concepto de intensidad luminosa. [1]

### 1.1.5 Nivel de iluminación (Iluminancia)

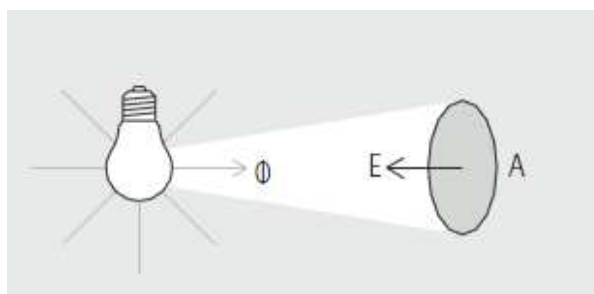
Los niveles de iluminación se definen como la relación entre el flujo luminoso y el área de superficie a la cual incide dicho flujo. Se simboliza con la letra  $E$  y su unidad es el *lux*. Por lo tanto, su expresión es:

$$E = \frac{\Phi_L}{S} \quad lux = \frac{lm}{m^2} \quad (1.4)$$

donde:  $E$  = iluminancia [ $lux$ ]

$\Phi_L$  = flujo luminoso [ $lm$ ]

$S$  = superficie [ $m^2$ ]



**Figura 1. 4** Nivel de iluminancia. [1]

### 1.1.6 Iluminancia promedio

Es una medida importante que hay que considerar en el momento de realizar cualquier proyecto de iluminación. Se define como la relación entre la sumatoria de las iluminancias calculadas en cada punto considerado entre el número de dichos puntos. Por lo tanto:

$$E_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n Ep_i}{n} \quad lux \quad (1.5)$$

donde:  $E_{med}$  = iluminación media

$Ep_i$  = iluminación en el  $i$ -ésimo punto

$n$  = número de puntos considerados

### 1.1.7 Luminancia

Se define como la relación entre la intensidad luminosa y la superficie proyectada verticalmente a la dirección de irradiación. Dicha superficie es igual al producto de la superficie real iluminada por el coseno del ángulo ( $\beta$ ) que forma la dirección de

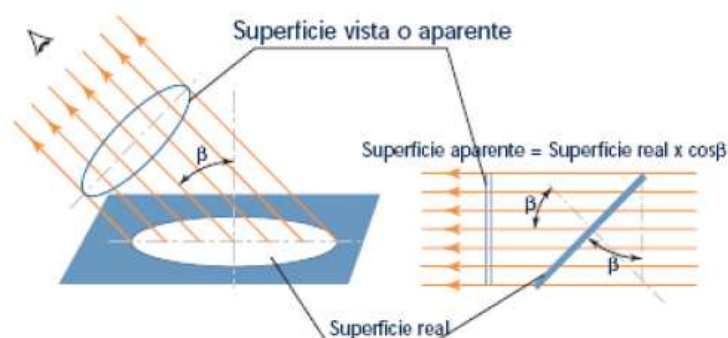
la intensidad luminosa y su normal (Figura 1.5). Su unidad es la candela por metro cuadrado ( $cd/m^2$ ), y su expresión correspondiente es:

$$L = \frac{I}{S \cos \beta} \quad \frac{cd}{m^2} \quad (1.6)$$

donde:  $L$  = luminancia [ $cd/m^2$ ]

$I$  = intensidad luminosa [ $cd$ ]

$S$  = superficie [ $m^2$ ]



**Figura 1.5** Luminancia de una superficie. [1]

### 1.1.8 Uniformidad

La iluminancia proporcionada en una superficie determinada nunca será totalmente uniforme. Esto se debe a que siempre habrá diferencias de valores de iluminancia dentro del escenario visual iluminado. Para definir la uniformidad de los niveles de iluminación en un área es necesario definir los factores que determinan las variaciones de iluminancia.

- **Factor de uniformidad general de iluminancia.** Es la relación entre la iluminación mínima y la iluminación media sobre una superficie de una instalación de alumbrado. Se simboliza por  $U_m$  y su unidad está dada en por ciento (%) o por una relación. Su expresión es:

$$U_m = \frac{E_{min}}{E_{med}} \quad (1.7)$$

- **Factor de uniformidad extrema.** Es la relación entre la iluminación mínima sobre una superficie de una instalación de alumbrado. Se simboliza por  $U_e$  y su unidad está dada en por ciento (%) o por una relación. La expresión que la define es:

**Tabla 1. 1** Magnitudes empleadas en sistemas de iluminación [4]

| Cantidad y símbolo                            | Unidades  | Unidad                 | Definición  |
|---|---|------------------------|---|
| Intensidad luminosa ( $I$ )                   | Candela   | Cd                     | La intensidad luminosa de una fuente de 555.061 nm (o $540 \times 10^{12}$ Hz) la cual tiene una intensidad radiante en una dirección dada de 1/683 W por estereoradian, cuando es medida en esa dirección. (Formalmente definida como 1/60 de la intensidad de un centímetro cuadrado de un cuerpo negro a la temperatura de solidificación del platino) |
| Luminancia (o "Brillo fotométrico") ( $L$ )   | Candela por metro cuadrado (también llamdo "nit") | Cd/m <sup>2</sup>      | La intensidad de una fuente en una dirección dada, dividida por su área proyectada ortogonalmente en dicha dirección.   |
| Luminous flux ( $F$ )                         | Lumen   | lm                     | Una fuente puntual isotrópica (la cual emite radiación igual en todas las direcciones) de intensidad una Candela produce un flujo de $4\pi$ lumens.   |
| Iluminancia $E$ (también llamada iluminación) | Lux   | lx                     | La concentración de flujo luminoso <i>falling</i> sobre una superficie. Un <i>Lux</i> es un lumen por metro cuadrado  |
| Intensidad radiante ( $I_e$ )                 | Vatio por estereoradián                           | W/sr                   | Potencia radiante emitida por una fuente puntual en una dirección dada.   |
| Radiancia                                     | Vatios por estereoradian por metro cuadrado       | W/(sr.m <sup>2</sup> ) | La intensidad radiante de una fuente en una dirección dada dividida por su área proyectada ortogonalmente en esa dirección.   |
| Flujo radiante ( $\Phi_E$ )                   | Vatios por estereoradian por metro cuadrado       | W                      | Potencia de radiación de una fuente para cualquier longitud de onda.  |
| Irradiancia                                   | Vatios por metro cuadrado                         | W/m <sup>2</sup>       | Potencia radiante incidida sobre una superficie.  |

## **1.2 TIPOS DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN [1], [4]**

Los humanos poseen una capacidad extraordinaria para adaptarse a su entorno. La luz es muy importante porque es un elemento esencial de nuestra capacidad de ver. Además, la mayor parte de la información que recibimos a través de los sentidos la obtenemos a través de la vista. La luz es una radiación electromagnética de longitud de onda entre 380 y 750 nm.

### **1.2.1 Características generales de las lámparas**

Una lámpara o bombilla es un convertidor de energía, cuya función principal es transformar la energía eléctrica en luz. Actualmente en el mercado existe una gran variedad de lámparas, con diferentes características y funcionamientos. Existen diferentes parámetros para definir las características de una lámpara.

- Lumen (lm): unidad que mide la cantidad de luz emitida.
- Rendimiento de color (IRC): los colores que vemos dependen de las características cromáticas de la fuente de luz. Así, el IRC señala la capacidad de una fuente de luz artificial en reproducir los colores, siendo la referencia (100%) el Sol.
- Vida útil: es el tiempo estimado en horas después del cual es preferible sustituir las lámparas de una instalación para evitar una disminución excesiva de los niveles de iluminación.
- Eficiencia o rendimiento luminoso: cantidad de luz emitida (lm) por unidad de potencia eléctrica consumida (W).

### **1.2.2 Evolución de las lámparas eléctricas**

Aunque el progreso tecnológico ha permitido producir diferentes tipos de lámparas, los principales factores que han influido en su desarrollo han sido fuerzas externas al mercado. Pero, sin duda alguna, fue la generación y

distribución de electricidad a gran escala la que determinó el crecimiento del mercado. Después de la segunda Guerra Mundial la lámpara fluorescente se convirtió en la fuente de luz dominante y años más tarde, en la década de los 70, se perfeccionó su diseño para reducir el consumo eléctrico sin perder la calidad de luz que producían.

### 1.2.3 Lámparas incandescentes

Las lámparas incandescentes están formadas por un hilo de tungsteno (Wolframio) que se calienta por efecto Joule consiguiendo temperaturas tan elevadas que empiezan a emitir luz visible. Para evitar que el filamento se quemara (en contacto con el aire que lo oxidaría) se envuelve en una botella de cristal que se llena con un gas para evitar la evaporación del filamento y dejar el globo negro. En general, el rendimiento de este tipo de lámpara es bajo porque la mayor parte de la energía consumida se convierte en calor.

#### Tipos de lámparas incandescentes

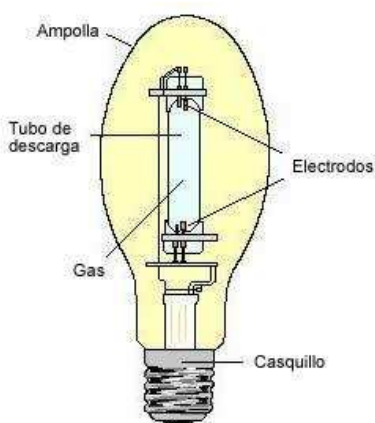
- *Lámparas no halógenas*: dentro este grupo encontramos las lámparas a las que se ha realizado el vacío en la botella o las que contienen un gas. Estas lámparas tienen una duración normalizada de 1000 h, un rendimiento realmente bajo entre 12 y 18 lm/W (únicamente convierten en luz aproximadamente un 15% de la electricidad consumida) y un IRC cercano al 100%. En la actualidad, las lámparas de vacío prácticamente no se utilizan. Con el paso del tiempo se puede producir el ennegrecimiento de la botella a causa de la evaporación de las partículas del tungsteno que forman el filamento.
- *Lámparas halógenas*: contienen una pequeña cantidad de gas ( $\text{CH}_2\text{Br}_2$ ), que crea un ciclo de regeneración del alógeno que evita el ennegrecimiento. El funcionamiento de estas lámparas necesita temperaturas muy elevadas para que se pueda producir el ciclo del halógeno. Por eso, son más pequeñas y compactas que las lámparas



normales y las botellas se fabrican con un cristal de cuarzo que resiste mejor las temperaturas elevadas. Tienen una duración de 1.500h, un rendimiento aproximado de 20 lm/W y un IRC también muy cercano al 100%.

#### 1.2.4 Lámparas de descarga

Las lámparas de descarga son una forma alternativa de producir luz de un modo más eficiente y económico que las lámparas incandescentes. En este caso la luz se consigue estableciendo una corriente eléctrica entre dos electrodos situados en un tubo lleno de gas, existiendo entre los electrodos una diferencia de potencial que provoca las descargas eléctricas necesarias para conseguir luz. Para que estas lámparas funcionen correctamente es necesario, en la mayoría de casos, la presencia de unos elementos exteriores. Los cebadores son dispositivos que suministran un poco de tensión entre los electrodos del tubo, necesarios para iniciar la descarga y vencer así la resistencia inicial del gas a la corriente eléctrica. Hay otros dispositivos que sirven para limitar la corriente que atraviesa la lámpara y de este modo evitar un exceso de electrones circulando por el gas que aumentaría el valor de la corriente hasta producir la destrucción de la lámpara.

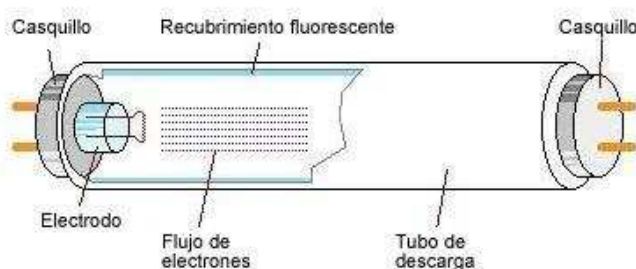


**Figura 1. 6** Lámpara de descarga. [4]

### 1.2.5 Lámparas fluorescentes

No tienen botella exterior, están formadas por un tubo cilíndrico cerrado en cada uno de sus extremos donde se sitúan los electrodos. El tubo de descarga está lleno de vapor de mercurio a baja presión y una pequeña cantidad de gas que sirve para facilitar el encendido y controlar la descarga de los electrodos. La duración de estas lámparas se sitúa entre 5.000 y 10.000 horas. El rendimiento en color de estas lámparas es aproximadamente del 70%.

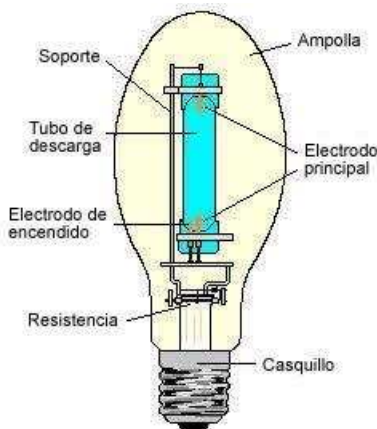
Hace poco tiempo aparecieron las lámparas fluorescentes compactas que llevan incorporados los elementos auxiliares para facilitar el encendido y para limitar la corriente. Son lámparas pequeñas, pensadas para sustituir las lámparas incandescentes con un ahorro energético que puede llegar al 70% y con muy buenas prestaciones (entre los 70 lm/W y un IRC que puede llegar al 90%).



**Figura 1.7** Lámpara fluorescente. [4]

### 1.2.6 Lámparas de vapor de mercurio de alta presión

Cuando se aumenta la presión de mercurio en el interior del tubo de descarga la radiación ultravioleta característica de las lámparas de baja presión pierde importancia respecto las emisiones en la zona visible. Con estas condiciones la luz emitida es de color azul-verde, para solucionar este problema se acostumbran a añadir sustancias fluorescentes para mejorar las características cromáticas de la lámpara. La vida útil de este tipo de lámparas es de unas 8.000 horas.



**Figura 1. 8** Lámpara de vapor de mercurio. [4]

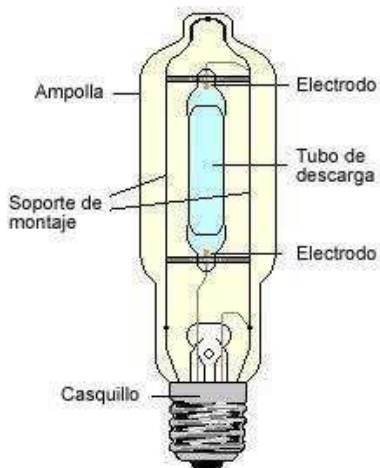
### 1.2.7 Lámparas con halogenuros metálicos

Si a los tubos de descarga añadimos yoduros metálicos se consigue una mejor capacidad de reproducir los colores de las lámparas de vapor de mercurio. La vida media de estas lámparas está cerca de las 10.000 horas. Necesitan 10 minutos para encenderse, que es el tiempo necesario para que establezca la descarga. Por su funcionamiento es necesario un dispositivo especial de encendido ya que las tensiones que necesitan al inicio son muy elevadas.

Sus buenas características cromáticas las hacen adecuadas para la iluminación de las instalaciones deportivas, para retransmisiones de TV, estudios de cine, etc.

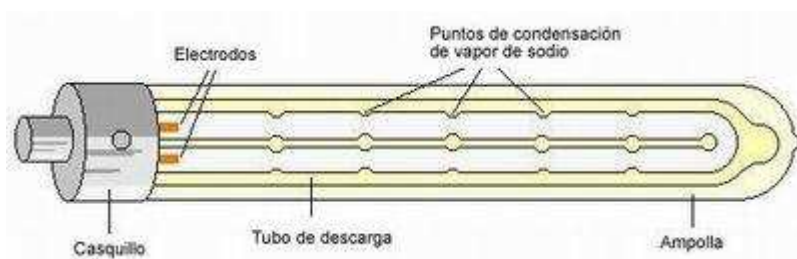
### 1.2.8 Lámparas de vapor de sodio a baja presión

La descarga eléctrica en un tubo con vapor de sodio a baja presión produce una radiación monocromática característica. El tubo de descarga tiene forma de U para reducir las pérdidas de calor y el tamaño de la lámpara. Los tubos se fabrican con materiales muy resistentes porque el sodio es muy corrosivo y se cierra en una botella en la que se ha realizado el vacío para aumentar el aislamiento térmico.



**Figura 1.9** Lámpara con halogenuros metálicos. [4]

Estas lámparas ofrecen comodidad visual y una buena percepción de los contrastes, sin embargo, el hecho de que sean monocromáticas hace que la reproducción de los colores sea mala. La vida media de estas lámparas es muy larga, sobre 15.000 horas y su vida útil es de entre 6.000 y 8.000 horas. Se acostumbra a utilizar para el alumbrado público, pero también con finalidades decorativas.



**Figura 1.10** Lámparas de vapor de sodio a baja presión. [4]

### 1.2.9 Lámparas de vapor de sodio a alta presión

Proporcionan una luz blanca dorada mucho más agradable que la que proporcionan las lámparas de baja presión y tienen mejor capacidad para reproducir los colores. La vida media de estas lámparas es de 20.000 horas y su vida útil está entre 8.000 y 12.000 horas. Las condiciones de funcionamiento son muy exigentes ya que necesitan otras temperaturas. En su interior hay una

mezcla de sodio, vapor de mercurio para amortiguar la descarga que sirve para facilitar el encendido de la lámpara y reducir las pérdidas térmicas. El tubo está dentro de una botella donde se ha hecho el vacío. Este tipo de lámparas tienen muchas aplicaciones, tanto en iluminación de interiores como de exteriores. Se acostumbra a utilizar en la iluminación de naves industriales, en el alumbrado público o en la iluminación decorativa.



**Figura 1. 11** Lámpara de vapor de sodio a alta presión. [4]

### 1.2.10 LEDs de luz blanca

Las bombillas de LEDs de luz blanca son unos de los progresos más novedosos en el ámbito de la iluminación. Y están muy bien posicionados para poder sustituir a las bombillas actuales. Se trata de un dispositivo semiconductor que emite luz cuando se polariza y es atravesado por la corriente eléctrica.

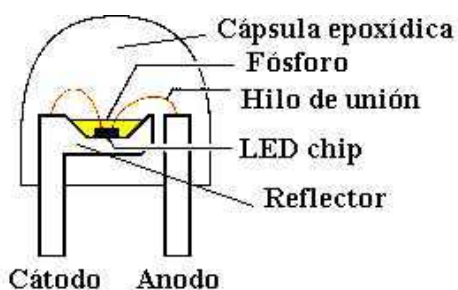
El uso de lámparas basadas en la tecnología LED se está incrementando de una forma notable últimamente, ya que tiene una vida útil más prolongada que cualquier otro tipo de lámpara, una menor fragilidad y un mayor aprovechamiento de la energía.



**Figura 1. 12** Lámpara LED. [4]

Los LEDs de luz blanca son diodos azules, que permiten luz a una longitud de onda de unos 460nm, recubiertos con una capa de un derivado de fosforo. El fosforo absorbe la luz azul y la remite a distintas longitudes de la onda en el espectro visible, generando luz blanca. Están basados en semiconductores de InGaN (Nitruro de Indio y Galio), difíciles y raros, y por tanto caros.

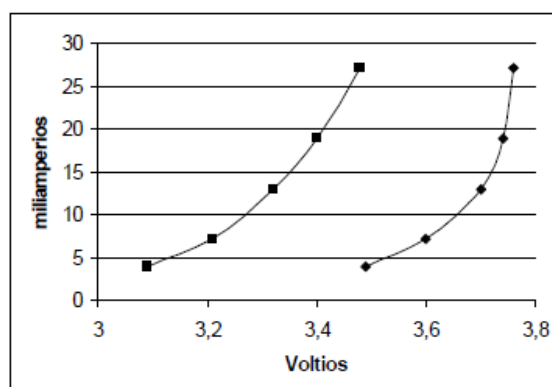
Existen LED con distintos reflectores lo que permite variar el ángulo de apertura del haz luminoso. La mayoría de los LEDs de luz blanca, útiles a nuestros propósitos, se comercializan con ángulos de visión de 20°, 50° y 70°. Este ángulo no es el de apertura máxima si no que se refiere al doble de la apertura en la cual la intensidad luminosa ha disminuido la mitad respecto a la máxima central. Por ejemplo, en uno de 20°, la intensidad ha disminuido a la mitad a los 10° de apertura respecto al centro focal. La apertura no cambia la cantidad de luz emitida (se suele dar en lumen), solo la forma en que esta se disminuye.



**Figura 1. 13** Visión esquemática de un LED de luz blanca. [4]

A continuación se detallan las características eléctricas que poseen los diodos y lámparas LED:

- En primer lugar destacar que estos LEDs son sensibles a la electricidad estática y por tanto es mejor mantenerlos, antes de ser montados en el sistema, en plástico antiestático o en papel de aluminio. Para su manipulación es aconsejable descargarse de electricidad estática tocando una buena toma de tierra (puede ser una tubería de agua metálica) y trabajar con soldador y pulsera antiestático conectados a tierra.
- Un LED al ser un diodo posee una polaridad que debe ser respetada, una inversión de polaridad con voltaje excesivo los puede dañar. Normalmente el voltaje inverso máximo es de unos 5v.
- La intensidad nominal es de 20mA (miliamperios) con una caída de tensión típica de 3,6v, lo que corresponde a una potencia disipada de 72mW (milivatios). Los parámetros máximos son de 30mA y 120m W, siempre que se mantenga el conjunto a temperaturas inferiores a 25° C. Si se supera la temperatura máxima de la unión de semiconductores (unos 100° C) el diodo se funde. En realidad, los LEDs poseen una respuesta no lineal de la intensidad frente al voltaje, incluso entre diodo de la misma procedencia se observan variaciones notables de estas características. Por lo general los diodos presentan variaciones de voltaje entre 3.27V y 3.85V a una intensidad fija de 27mA.



**Figura1. 14** Relación entre la intensidad y el voltaje para diodos de la casa. [4]

- Teóricamente con los LEDs se pueden conseguir eficacias luminosas de más de 200 lumen/vatio, aunque actualmente está entre 15 y 25 lumen/vatio. En algunos sitios se dice que su eficacia esta muy por encima que la mayoría de otras fuentes luminosas, pero esto es discutible. Por ejemplo una bombilla normal de las utilizadas en una frontal tiene unos 5 lumen/vatio, una buena halógena puede estar sobre 15-20 lumen/vatio, las fluorescentes rondan los 80 lumen/vatio y las dos de sodio de baja presión (esas amarillentas utilizadas en alumbrado público) los 150 lumen/vatio. Como se ve superan a las lámparas de wolframio normales y están en el orden o ligeramente por encima de las halógenas, pero están bastante alejadas aun de otros sistemas de iluminación ,
- La duración de los LEDs de luz blanca es de unas 1000.000 horas. Esta es una duración del elemento semiconductor y en condiciones de laboratorio. En realidad el fosforo, incluso el encapsulado epóxico se degradan con el tiempo y sobre todo con la temperatura, lo que se traduce en una pérdida progresiva de la luminosidad y el color. Un cálculo más realista puede situar la duración en unas 1000.000 horas, con una perdida luminosa del 50%.
- La intensidad luminosa depende también de la temperatura de la unión semiconductor de forma que cuanto más baja sea esta, mayor es la intensidad.
- La luz que emiten es una luz blanca ligeramente azulada. Para la medida de la tonalidad de la luz blanca se utilizan como referencia la luz emitida por un cuerpo negro ideal a distintas temperaturas medidas en grado Kelvin (K). A temperaturas bajas la luz tiene una totalidad se vuelve azulada. Por ejemplo las lámparas de wolframio estándar emiten por debajo de 2900K (muy amarillas), las halógenas entre 2900-3100K, las fluorescentes entre 2700-4000K y los LEDs blancos a 6500K (existen de otros rangos). Como referencia indicar que la luz del día es de 5800 K. Como se va la luz de los LEDs es muy parecida a la luz del día, pero un poco más azulada.
- Son totalmente regulables y se puede trabajar a distintas intensidades sin perder eficacia, incluso con bajas intensidades esta aumenta hasta en un 30-40%. Son una clara diferencia con las frontales normales, las cuales



difícilmente son regulables y aunque producen una luz razonable, esta decae rápidamente al bajar un poco el voltaje de estas.

## **1.3 CARACTERÍSTICAS ERGONÓMICAS DE ILUMINACIÓN PARA CENTROS DE ESTUDIO**

### **1.3.1 Diseño de iluminación [1], [2], [4]**

La aplicación científica de iluminación artificial es una disciplina relativamente joven. En contraste a la iluminación natural, la cual muestra un desarrollo gradual hace miles de años, la necesidad de desarrollar conceptos para la iluminación artificial llegó a ser un requerimiento sólo hasta el último siglo. Apenas hace 200 años la planificación usando fuentes de iluminación artificial fue confinada a decidir cuál es la mejor posición para que las pocas velas o lámparas disponibles proporcionen una óptima iluminación. Con el rápido desarrollo de fuentes de luz eficientes, el diseño de iluminación ha adquirido las herramientas que han permitido a estas fuentes artificiales producir adecuados niveles de luminosidad. Este desarrollo está acompañado, sin embargo, por la tarea de definir los objetivos y métodos para las aplicaciones de esta nueva disciplina.

### **1.3.2 Diseño de iluminación cuantitativo**

El primero y hasta la fecha el concepto más efectivo ha dado lugar a un conjunto de normas o criterios para la iluminación de lugares de trabajo. Mientras las decisiones con respecto a los sistemas de iluminación en el sector privado pueden estar limitadas a la selección adecuada de luminarias atractivas, hay un claro interés en el campo de la iluminación de lugares de trabajo para desarrollar efectivas y eficientes formas de iluminación. El principal acuerdo consiste en los niveles de luminosidad a los tipos de iluminación para lograr un desempeño visual óptimo, alta productividad y seguridad para que los gastos operativos sean asequibles.

### 1.3.3 Iluminación para el aprendizaje

Aprender es un largo proceso durante el transcurso de la vida de los seres humanos. En la moderna sociedad del conocimiento, en un mundo que llega a ser increíblemente complejo y de alta tecnología, necesitamos estar preparados para aprender o adquirir nuevas habilidades para el conocimiento y el aprendizaje.

En la actualidad existen varios centros de formación desde jardines de infantes, centros universitarios, entre otros. Un requerimiento importante para lograr un aprendizaje exitoso es el adecuado ambiente educacional: una escuela la cual reconoce talento y habilidad, un aprendizaje activo e independiente, haciendo de la educación una experiencia agradable y motivante. Por tanto la motivación y el sentido de hacer el bien, arquitectura e iluminación, condiciones favorables de visualización y aprendizaje eficiente son aspectos que se hallan conectados.

### 1.3.4 Necesidades humanas de iluminación

Las personas experimentan la primera sensación del ambiente a través de nuestros ojos, el 80% de las impresiones sensoriales que recibimos son visuales. Demasiada o muy poca luz, el brillo o la distorsión de los colores impactan sobre lo que percibimos, causando distracción y fatiga visual.

En todas las áreas de los lugares de trabajo una apropiada iluminación permitirá el correcto desenvolvimiento de las personas mediante una sensación de bienestar acompañado de un correcto desempeño. A continuación se enumeran los principales factores que son necesarios para considerar un correcto diseño de iluminación:

- **Iluminancia:** en la luz del día, la iluminancia de una superficie iluminada está entre 10 000 lux (cielo nublado) y 100 000 lux (luz del sol). Puertas adentro, son necesarios valores inferiores. Para escribir y leer generalmente es suficiente si la luz artificial provee 500 lux de iluminancia; para dibujar se debería tener al menos 750 lux. Los valores indicados en la norma son los

valores nominales requeridos, sin embargo la mayoría de gente encuentra un mayor nivel de iluminancia más agradable.

- **Distribución de brillo:** cuando las personas están en un salón, su mirada cambia continuamente desde cerca (mirando al escritorio) hasta lejos (mirando las paredes). Donde exista marcada diferencia de brillo entre estas zonas, los ojos muestran una constante necesidad de re-adaptarse llegando al cansancio más rápido. El desempeño visual y la sensación de bienestar disminuyen. Por ejemplo la luminancia de un escritorio debería no ser menor que  $1/3$  de la iluminancia en sus alrededores inmediatos. Para las partes más remotas del salón, la diferencia en iluminación debería ser  $1/5$ , máximo de  $1/10$ .
- **Limitación del deslumbramiento:** el deslumbramiento es uno de los problemas visuales más desagradable. Ser deslumbrado por una luz generalmente difusa o el reflejo de una ventana en una pantalla de computadora afecta la agudeza visual e impide un correcto desempeño. Los efectos del deslumbramiento pueden evitarse en gran medida por el diseño correcto del sistema de iluminación.
- **Modelado:** sin luz no se puede ver ningún objeto, con sombra es como ver una imagen en dos dimensiones. Para reconocer objetos en tres dimensiones, superficies y estructuras, se necesita luz y sombra.

### 1.3.5 El rol práctico del control de iluminación

Cuando la iluminación eléctrica estaba ampliamente disponible la gente estaba contenta de tener suficiente luz, sin quejarse demasiado por las apariencias. Sin embargo, pronto se dio cuenta que la calidad de la luz eléctrica puede ser mejorada en gran medida por la difusión de la luz eléctrica, la eliminación de resplandor, inclusive la selección de sistemas de iluminación llamativos.

Siendo aún el caso en que la calidad de la iluminación es determinada principalmente por la elección y disposición de las luminarias y lámparas, y por la naturaleza de las superficies que están iluminadas. Sin embargo, hay muchas

situaciones donde se utiliza luz artificial en variadas circunstancias, variable en cuanto al número de parámetros que pueden cambiar, por ejemplo:

- La contribución de la luz del día.
- La actividad en el área del sistema de iluminación puede cambiar.
- La actividad en si misma puede requerir condiciones de iluminación variable.

Dentro del campo del diseño de iluminación se pueden reconocer aplicaciones de tipo práctico, estético y ahorro de energía. Hay actividades como las educativas, de oficinas, museos, entre otras, donde la luz del día puede hacer una contribución significativa a la iluminación del local, pero donde la iluminación eléctrica debe ser controlada para aumentar o remplazar la luz natural. Esta acción se puede llevar a cabo de manera conmutada (control discreto) o de forma continua.

En todas estas aplicaciones prácticas de control de la iluminación el diseño del sistema debe ser lo más simple posible. Actualmente existe una amplia gama de tecnología para llevar a cabo este objetivo, la tarea básica consistirá en seleccionar la más adecuada garantizando el correcto desempeño del sistema.

El uso de energía es una preocupación en todo el mundo, tanto en términos de su costo y de su efecto sobre el medio ambiente. El control de iluminación puede hacer una gran contribución al ahorro de energía, pero una palabra de preocupación es necesaria. Cuando un esquema de iluminación tiene un complejo control de iluminación por razones estéticas o prácticas debería ser posible programar su funcionamiento para que utilice la energía de la manera más eficiente.

Sin embargo, cuando se propone instalar un sistema de control especial de iluminación (en oposición a una instalación simple y convencional que se activa manualmente) únicamente por motivos de ahorro energético, es importante comprobar los cálculos de amortización. Han existido casos de que algunos sistemas complicados controlados por ordenador han tenido una pobre recuperación de la inversión (y probablemente no han contribuido con un ahorro

significativo de energía). Algunos puntos importantes que emergen al respecto son:

- En muchas instalaciones la elección de la fuente de luz es el factor más importante en el consumo energético.
- La luz emitida por algunas fuentes de luz varía durante su vida. Del mismo modo que en algunas instalaciones la luz emitida desde las luminarias pueden variar de acuerdo a sus ciclos de limpieza. El control de iluminación puede garantizar que un nivel particular de luz sea mantenido, sin perder energía al inicio de la vida de la lámpara o durante su ciclo de funcionamiento.
- No todas las fuentes resultan ser prácticas para controles variables de tipo continuo.
- Siempre es necesario analizar el ámbito de aplicación para el ahorro energético por control de iluminación dentro de un área. A veces no hay ninguno.
- Nunca se debe olvidar que los sistemas totalmente automatizados que operan sin hacer referencia a las personas en el área de trabajo no son un éxito.
- Nuevos productos y nuevas tecnologías están incrementando la oportunidad de ahorrar energía por control de iluminación.

Un cálculo importante en cualquier esquema de control de iluminación es la recuperación de la inversión. Desde un punto de vista holístico, los cálculos serían complejos pues sería necesario conocer además de todas las alternativas en términos de caja, los costos en términos energéticos. Por ejemplo un tipo existente de lámpara con un controlador puede ahorrar energía durante un período de años, en comparación con un arreglo convencional. Sin embargo, si el costo de hacer la nueva lámpara o arreglo junto con su sistema de control fue mayor que el ahorro en materia de energía durante la vida útil prevista, no habría sentido para hacer un cambio del sistema de iluminación.

**Tabla 1.2** Comparación de costos para alternativas de balastro para lámparas fluorescentes de 230 V de alimentación. Para el cálculo se ha asumido un costo de \$0.12 por kWh. El sistema de control para el balastro podría variar, en este ejemplo se asume un uso efectivo. [4]

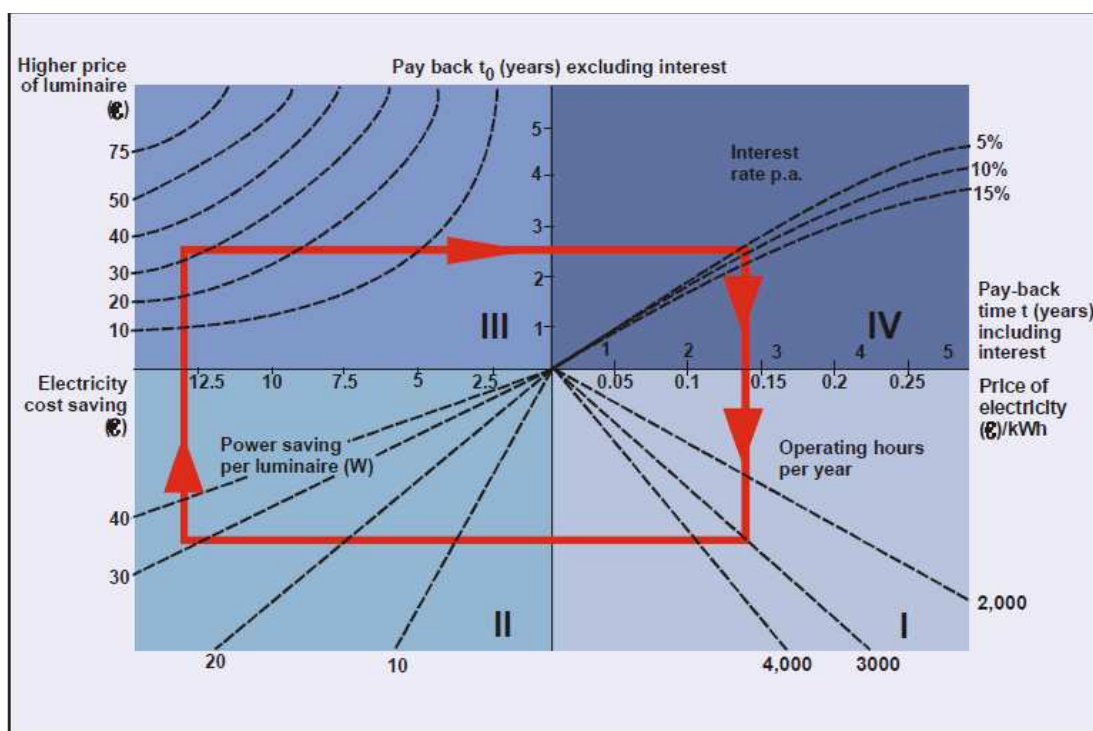
| Balastro  | Convencional electromagnético | Electromagnético de bajas pérdidas | Electrónico estándar | Electrónico controlable |
|---|-------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Potencia de sistema en [W] incluyendo pérdidas en el balastro | 142                           | 132                                | 110                  | 60                      |
| Ahorro de potencia [W]  |                               | 10                                 | 32                   | 82                      |
| Ahorro energético anual por 3200 h de operación [\$]          | 54.5                          | 50.7                               | 42.2                 | 23                      |
| Ahorro del costo de electricidad en [\$]                      |                               | 4.2                                | 12.3                 | 31.5                    |
| Precio más alto de la luminaria en [\$]                       |                               | 10                                 | 30                   | 56                      |
| Recuperación de la inversión simple [años]                    |                               | 2.38                               | 2.44                 | 1.78                    |
| Recuperación de la inversión al 7% de interés [años]          |                               | 2.77                               | 2.84                 | 2.07                    |

Cuando un sistema incluye lámparas halógenas incandescentes y de tungsteno usualmente lograrán conseguir el ambiente de iluminación correcto. A menudo las lámparas están sobre *dimmers* que permiten al diseñador de iluminación lograr el correcto balance de luz. La energía ahorrada por el uso del dimmer será muy pequeña (excepto cuando tenga un control acoplado) pero los costos iniciales podrían reducirse a cambio del incremento de la vida útil de la lámpara. Por el

contrario, hay que tener cuidado de no instalar un sistema que afecte negativamente la vida de la lámpara.

## 1.4 INFLUENCIA DE LA LEGISLACIÓN

Varios organismos de normalización a nivel mundial han hecho publicaciones acerca de los sistemas de iluminación. Aquí se presentan valores recomendados por la norma ANSI/IES RP-8 creada por la Sociedad de Ingenieros de Iluminación de Estados Unidos, IES/IESNA y respaldada oficialmente por la Asociación Americana de Normalización, ANSI. También se hace referencia a la norma ecuatoriana INEN 1 152 para iluminación natural de edificios, la cual es la única norma ecuatoriana afín al proyecto.



**Figura 1. 15** Diagrama para determinar la recuperación de la inversión para diferentes tipos de balastro. Se toma como referencia los balastros electromagnéticos convencionales. La línea roja indica el tiempo de recuperación de la inversión, tomando en cuenta 4 variable principales. [4]

En las últimas décadas la iluminación ha llegado a ser un tema de legislación nacional e internacional. Estas políticas principalmente hacen referencia a:

- El establecimiento de normas para ciertos tipos de iluminación para garantizar efectividad.
- Instaurar estándares relacionados a la seguridad.
- Garantizar el eficiente uso de la energía.
- Garantizar que los residuos de sistemas de iluminación (en especial de lámparas usadas) no perjudiquen al medio ambiente.



**Tabla 1.3** Niveles mínimos de iluminación requeridos para edificios y actividades en los mismos. [4]

| Tipo de actividad  | Categoría de iluminancia | Rangos de iluminancia |                | Referencias  |
|--|--------------------------|-----------------------|----------------|--|
|  |                          | Lux                   | Pie-candelas   |  |
| Espacios públicos con alrededores oscuros  | A                        | 20-30-50              | 2-3-5          | Iluminación general en todas partes  |
| Orientación sencilla para visitas temporales cortas  | B                        | 50-75-100             | 5-7.5-10       |  |
| Áreas de trabajo donde las tareas visuales son sólo ocasionalmente desempeñadas.                       | C                        | 100-150-200           | 10-15-20       |  |
| Desempeño de tareas visuales de alto contraste o gran tamaño.  | D                        | 200-300-500           | 20-30-50       | Iluminación para tareas  |
| Desempeño de tareas visuales de contraste medio o de reducido tamaño.                                  | E                        | 500-750-1000          | 50-75-100      |  |
| Desempeño de tareas visuales de contraste bajo o de muy reducido tamaño.                               | F                        | 1000-1500-2000        | 100-150-200    |  |
| Desempeño de tareas visuales de contraste bajo o de muy reducido tamaño durante un periodo prolongado. | G                        | 2000-3000-5000        | 200-300-500    | Iluminación para tareas obtenida por una combinación general y local (iluminación suplementaria) |
| Desempeño muy prolongado y exigente de tareas visuales.  | H                        | 5000-7500-10000       | 500-750-1000   |  |
| Desempeño de tareas visuales muy especiales de contrastes extremadamente bajos y reducido tamaño.      | I                        | 10000-15000-20000     | 1000-1500-2000 |  |

**Tabla 1. 4** Referencias de iluminancia para centros de estudio. [4]

| <b>Iluminancia (lux)</b> | <b>Lugares</b>  |
|--------------------------|---|
| 1500 - 300               | Salones de dibujo, costura y computación.   |
| 750 - 200                | Salones de clase, laboratorios, talleres, salones de investigación, salones de lectura en bibliotecas, salas de espera en facultades, salones de conferencia. |
| 300 - 150                | Salones de clase grandes, auditorios, escaleras.  |
| 150 - 75                 | Corredores, pasarelas, baños, áreas deportivas de centros educativos.   |
| 75 - 30                  | Almacenes, garajes, escaleras de seguridad.   |

## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS BORROSOS

#### 1.5 LÓGICA BORROSA [3], [9]

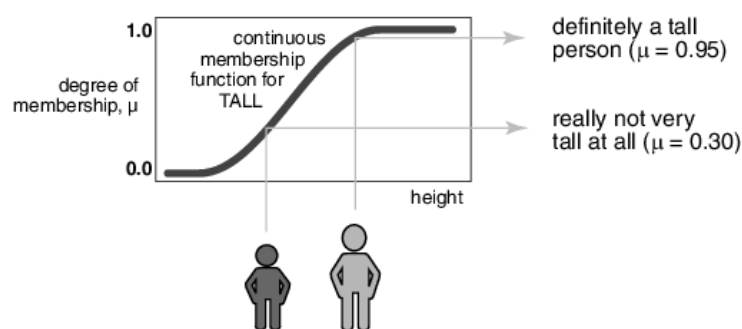
La denominada lógica borrosa (*fuzzy logic*) permite tratar información imprecisa como *temperatura media* o *mucha fuerza*, en términos de conjuntos borrosos o difusos. Estos conjuntos se combinan en reglas para definir acciones, como por ejemplo *si la temperatura es alta entonces enfriar mucho*. De esta manera, los sistemas de control basados en lógica borrosa combinan unas variables de entrada (definidas en términos de conjuntos borrosos), por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

Los sistemas basados en lógica borrosa pueden ser aplicados a problemas no lineales, permitiendo modelar cualquier proceso no lineal, y aprender de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje que pueden ser tomados de otros campos como las redes neuronales o algoritmos genéticos. No obstante, a diferencia de los sistemas neuronales, los basados en lógica borrosa permiten utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos, bien directamente, bien como punto de partida para una optimización automática, al formalizar el conocimiento a veces ambiguo de un experto de una forma realizable. Además, gracias a la simplicidad de los cálculos necesarios (sumas y comparaciones, fundamentalmente), normalmente pueden realizarse en sistemas baratos y rápidos.

#### 1.6 CONJUNTOS BORROSOS

La *teoría de conjuntos borrosos* parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una función de pertenencia al conjunto, definida ésta como un número real entre 0 y 1. Sí, se introduce el concepto de conjunto o subconjunto borroso asociado a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística *A*. Para cada conjunto o subconjunto borroso se define una *función de*

*pertenecía* o *inclusión*  $\mu_A t$ , que indica el grado en que la variable  $t$  está incluida en el concepto representado por la etiqueta  $A$ . Como puede verse en la Figura 2.1 para el valor lingüístico *estatura de una persona* podrían definirse varios subconjuntos borrosos identificados por una etiqueta, por ejemplo {Bajo, Medio, Alto} y con una función de inclusión o pertenencia  $\mu_{Bajo} t$ ,  $\mu_{Medio} t$ ,  $\mu_{Alto} t$ .



**Figura 2. 1** Ejemplo de un conjunto borroso para la variable estatura. [5]

En los conjuntos clásicos algo está completamente incluido en él o no lo está en absoluto. Esta situación puede describirse asignando un 1 a todos los elementos incluidos en el conjunto y un 0 a los no incluidos. A la función que asigna estos valores se denomina *función de membresía*<sup>1</sup>, *inclusión* o *pertenecía*. Los conjuntos borrosos permiten describir el grado de pertenecía o inclusión de un objeto (o el valor de una variable) al concepto dado por la etiqueta que le da nombre, asignando un número real entre 0 y 1.

Sea  $U$  un conjunto de objetos, por ejemplo,  $U = \mathfrak{R}^n$ , que se denominará *universo de discurso*. En términos matemáticos, un *conjunto borroso*  $F$  en  $U$  queda caracterizado por una función de inclusión  $\mu_F$  que toma valores en el rango  $[0, 1]$ , es decir,

$$\mu_F: U \rightarrow [0, 1];$$

donde  $\mu_F u$  representa el grado en el que  $u \in U$  pertenece al conjunto borroso  $F$ . Ello representa la generalización del concepto clásico de conjunto en el que la

<sup>1</sup> Uso de membresía o membrecía: Esta palabra se puede ver escrita tanto **membresía** (mayoritaria, probablemente porque sea una adaptación del Inglés *membership*) como **membrecía**. Ambas formas están aceptadas por igual en la Nueva gramática de las Academias. ([www.wilkilengua.org](http://www.wilkilengua.org))

función de pertenencia toma solamente los valores de 0 o 1; por el contrario, para un borroso, la función puede tomar también valores intermedios.

Dado un cierto conjunto borroso  $F$ , se definen los siguientes términos (véase la Figura 2.2):

- El *conjunto soportado* es el conjunto (clásico) de todos los valores de  $U$  para los que  $\mu_F u > 0$ .
- Los *conjuntos de cruce* son aquellos valores para los que  $\mu_F u = 0.5$ .
- Se dice que un conjunto borroso es de tipo *singleton* si su conjunto soportado es de un solo valor.
- Se denomina *conjunto  $\alpha$ -corte*  $F_\alpha$  de un conjunto borroso  $F$ , al conjunto clásico de todos los puntos  $u$  de  $U$  para los que se cumple  $\mu_F u > \alpha$ .
- Se dice que un conjunto borroso está *normalizado* si el máximo de su función de inclusión es 1; obviamente, un conjunto borroso puede *normalizarse* multiplicando su función de inclusión por un coeficiente fijo para que sea de tipo normalizado.

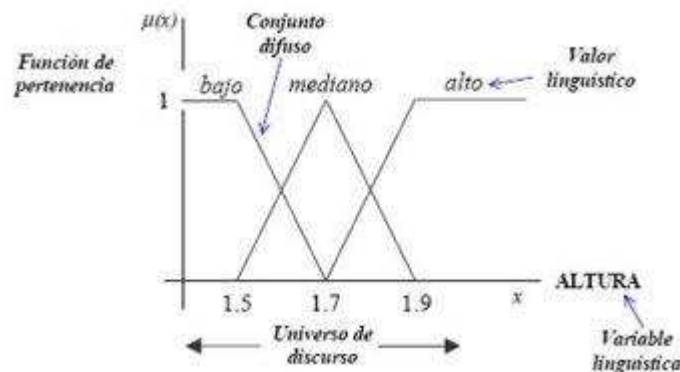


Figura 2. 2 Términos relativos a los conjuntos borrosos. [3]

## 1.7 FUNCIONES DE INCLUSIÓN DE CONJUNTOS BORROSOS

La *función de inclusión o pertenencia* de un conjunto borroso consiste en un conjunto de pares ordenados  $F = \{u, \mu_F u \mid u \in U\}$  si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. Para la definición de estas funciones de pertenencia se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar, por coincidir con el significado lingüístico de las etiquetas más utilizadas. Las más

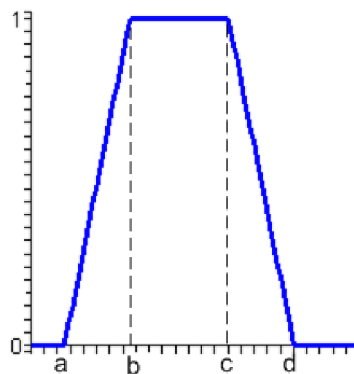
frecuentes son la función tipo trapezoidal, singleton, triangular, S, exponencial y tipo  $\pi$ .

### 1.7.1 Función tipo trapezoidal

Se define por cuatro puntos  $a, b, c, d$  como sigue:

$$S(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ 1 & b \leq u \leq c \\ \frac{d-u}{d-c} & c \leq u \leq d \\ 0 & u > d \end{cases} \quad (2.1)$$

Se utiliza habitualmente en sistemas borrosos sencillos, pues permite definir un conjunto borroso con pocos datos, y obtener su valor de pertenencia con pocos cálculos. Se emplea especialmente en sistemas basados en microprocesador, pues con similar formato pueden codificarse también funciones de tipo S, tipo  $\pi$ , triangular y singleton, según se distribuyan los puntos  $a, b, c$  y  $d$ .



**Figura 2.3** Función trapezoidal. [3]

Para modelar una función triangular se hace  $b=c$ , para una función tipo S (pero no suave) se hace  $c=d=\max(U)$ , y para una función de tipo singleton  $a=b=c=d$  (Figura 2.3).

### 1.7.2 Función tipo singleton

Esta función tiene un valor 1 sólo para un punto  $a$  ( $v_0$ ) y 0 para el resto. Se utiliza habitualmente en sistemas borrosos simples para definir los conjuntos borrosos de las particiones de las variables de salida, pues permite simplificar los cálculos y requiere menos memoria para almacenar la base de reglas. Se define con:

$$S_{u;a} = \begin{cases} 1 & u = a \\ 0 & u \neq a \end{cases} \quad (2.2)$$

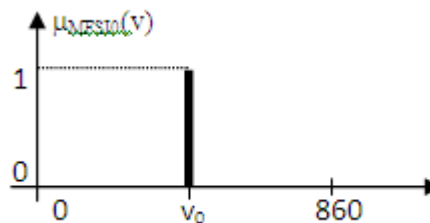


Figura 2. 4 Función tipo singleton. [3]

### 1.7.3 Función tipo triangular

Se define como

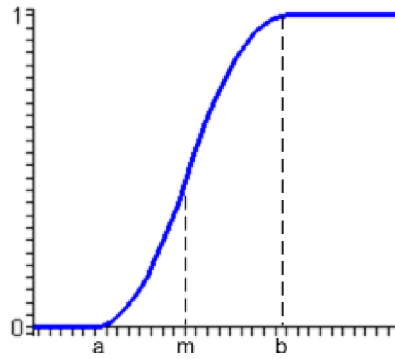
$$T_{u;a,b,c} = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b} & b \leq u \leq c \\ 0 & u > c \end{cases} \quad (2.3)$$

Esta función es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de cero para un rango de valores estrecho en torno a un punto  $b$ .

### 1.7.4 Función tipo S

Se define como:

$$S(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ 2 \frac{u-a}{c-a}^2 & a \leq u \leq b \\ 1 - 2 \frac{u-a}{c-a}^2 & b \leq u \leq c \\ 1 & u > c \end{cases} \quad (2.4)$$



**Figura 2. 5** Función tipo sigmooidal o S. [3]

Esta función se caracteriza por un valor de inclusión distinto de 0 para un rango de valores por encima de cierto punto  $a$ , siendo 0 por debajo de  $a$  y 1 para valores mayores de  $c$ . Su punto de cruce (valor 0.5) es  $b = (a + c) / 2$ ; y entre los puntos  $a$  y  $c$  es de tipo cuadrático. También se han utilizado funciones exponenciales para definir funciones tipo S, como

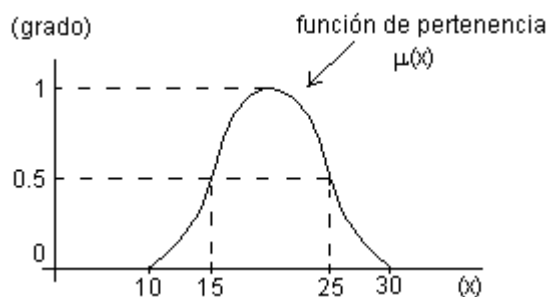
$$S(u; k, c) = \frac{1}{1 + \exp(-k(u - b))} \quad (2.5)$$

### 1.7.5 Función tipo $\pi$

Se define de la siguiente forma:

$$S(u; b, c) = \begin{cases} S(u; c - b, \frac{c-b}{2}, c) & u \leq c \\ 1 - S(u; c - b, \frac{c-b}{2}, c) & u \geq c \end{cases} \quad (2.6)$$





**Figura 2. 6** Función tipo  $\pi$ . [3]

Esta función tiene forma de campana, y resulta adecuada para los conjuntos definidos en torno a un valor  $c$  (ver figura 2.6). Pueden definirse también utilizando expresiones analíticas exponenciales o cuadráticas, como la bien conocida campana de Gauss.

## 1.8 VARIABLE LINGÜÍSTICA

Se denomina *variable lingüística* a aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje normal como *mucho*, *poco*, *positivo*, *negativo*, etc., que son palabras que desempeñan el valor de etiquetas en un conjunto borroso. Aunque el objetivo principal de este concepto es expresar de manera formal el hecho de que pueden asignarse como valor de una variable palabras tomadas del lenguaje natural, no obstante a una variable lingüística podrán asignarse también valores numéricos. Así, en una expresión como *la temperatura es fría*, la variable temperatura debe ser entendida como una variable lingüística, pues se le asigna el conjunto borroso *fría*, pero además esta variable puede también tomar valores numéricos como *la temperatura es 4°C*.

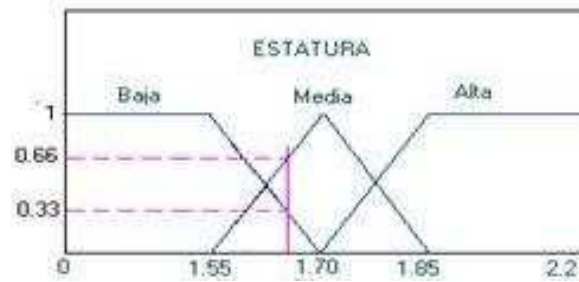
En términos más formales, una variable lingüística se define por una tupla  $T(A, U, G, M)$ , donde  $A$  es el nombre de la variable,  $T(A)$  es el conjunto de términos que nombran los valores  $x$  que puede tomar  $A$ , valores que son conjuntos borrosos en  $U$ ; el conjunto de valores que puede tomar para una variable discreta, o el rango de valores posibles para una continua, es lo que se conoce como el universo de discurso de la variable  $x$ , y se nombra como  $U$ ; por

último,  $G$  es una regla sintáctica para la generación de los nombres de los valores de  $x$ , y  $M$  es una regla semántica para asociar un significado a cada valor.

El siguiente ejemplo permitirá comprender el sentido de estos términos formales. *Temperatura* puede considerarse como una variable lingüística, de modo que  $A = \text{temperatura}$ .  $T(\text{temperatura})$  es el conjunto de todos los términos que pueden hacer referencia a la temperatura, como *muy fría*, *fría*, *normal*, *alta*, *muy alta*. El universo de discurso  $U$  de esta variable va, en general, desde el cero absoluto al infinito, pero en aplicaciones normales se suele restringir al rango de temperaturas que pueden representarse en ella (por ejemplo, temperaturas entre 0 y 40°C).

## 1.9 PARTICIONES BORROSAS

Dada una variable  $A$ , definida en un rango entre  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , es posible establecer en ella diversas particiones. Se conoce como *partición* a un conjunto de los conjuntos borrosos que se han definido para la variable  $A$ . Una partición de  $A$  es uno de los subconjuntos que pueden formarse con los elementos de  $T(A)$ . Así, para la variable estatura una posible partición sería la correspondiente a la Figura 2.7, con tres subconjuntos borrosos, cada uno identificado por una etiqueta, *Bajo*, *Medio*, *Alto*, y una función de inclusión o pertenencia,  $\mu_{\text{Bajo}}(t)$ ,  $\mu_{\text{Medio}}(t)$ ,  $\mu_{\text{Alto}}(t)$ . Se dice que una *partición es completa* si para todos los valores posibles de  $U$  existe en la partición un conjunto con pertenencia no nula, es decir, los conjuntos definidos cubren todo  $U$ ; así, completitud es el porcentaje de los elementos de  $U$  para los que existe en la partición un conjunto con pertenencia no nula frente al total de elementos de  $U$ . Se dice que dos conjuntos borrosos están *solapados* si su intersección es no nula; de este modo, el solapamiento de un conjunto borroso es la relación del número de elementos que comparte con otros conjuntos de la misma partición, respecto al número total de elementos que lo forman.



**Figura 2. 7** Particiones borrosas para la variable estatura. [3]

Para la realización de controladores basados en lógica borrosa se han de definir particiones de las variables del controlador. Normalmente se recomienda que estas particiones sean completas, con un solapamiento del 20% al 50%, y en número impar. Normalmente se emplean de 3 a 7 conjuntos, pues la complejidad no es excesiva y permiten una precisión suficiente en la descripción de los valores de la variable. Además, se recomienda definir conjuntos de tipo T (triangulares) en torno a puntos singulares, como el cero. Los nombres de los conjuntos borrosos que forman una partición se suelen expresar en forma abreviada por sus iniciales.

## 1.10 MEDIDAS BORROSAS

Dado un conjunto borroso  $A$ , se definen ciertas magnitudes medibles del conjunto, que se conocen como *medidas borrosas*.

### 1.10.1 Borrosidad

Si se llama  $C$  al conjunto discreto de los valores  $x$  en los que  $\mu_A x > 0$ , la *borrosidad* indica la distancia de  $A$  al conjunto discreto  $C$ . En otras palabras, la magnitud borrosidad mide cuál es el grado de borrosidad del conjunto.

### 1.10.2 Distancia entre dos conjuntos borrosos

Dados los conjuntos borrosos  $A$  y  $C$ , la distancia entre éstos se puede definir utilizando diversas medidas. Siendo más frecuentes las siguientes:

*Hamming*

$$f(A) = |\mu_A(x) - \mu_C(x)| \quad (2.7)$$

*Euclidea*

$$f(A) = \sqrt{|\mu_A(x) - \mu_C(x)|^2} \quad (2.8)$$

*Minkowski*

$$f(A) = |\mu_A(x) - \mu_C(x)|^w \quad \text{con } w \in [1, \infty) \quad (2.9)$$

### 1.10.3 Similitud

Mide el parecido entre dos conjuntos, y en su forma básica es una extensión de la distancia entre conjuntos.

### 1.10.4 Entropía borrosa

Indica sobre cuánta información aporta este conjunto a la descripción de la variable  $x$ . Se define para un conjunto borroso  $A$  como:

$$f(A) = -\mu_A(x) \cdot \log \mu_A(x) - (1 - \mu_A(x)) \cdot \log (1 - \mu_A(x)) \quad (2.10)$$

### 1.10.5 Agrupamiento borroso (clustering)

Es una técnica que se introduce para alcanzar una determinada representación de un espacio vectorial de vectores de entrada. Se basa en la medición de las distancias euclídeas entre vectores, y se utiliza para determinar las reglas borrosas que describen un sistema desconocido o *caja negra*. Uno de los métodos más conocidos para realizar el agrupamiento borroso es el método denominado de las *k-medias* (*k-means*), aunque existen muchas otras técnicas,

como las basadas en la entropía, o bien en los métodos de minimización energética.

## 1.11 OPERACIONES BORROSAS

A los subconjuntos borrosos se les puede aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto borroso se obtiene otro conjunto borroso; de la misma manera al combinar dos o más subconjuntos mediante alguna operación, se obtendrá otro conjunto.

Sean los subconjuntos borrosos identificados por las etiquetas  $A$  y  $B$ , asociados a una variable lingüística  $x$ , para ellos pueden definirse tres operaciones básicas: complemento, unión e intersección. Estas operaciones básicas pueden expresarse de la siguiente manera en términos de las funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos  $A$  y  $B$ .

*Complemento*

$$\mu_{A^c} x = 1 - \mu_A x \quad x \in U \quad (2.11)$$

*Unión*

$$\mu_{A \cup B} x = \max \mu_A x, \mu_B x \quad \forall x \in U \quad (2.12)$$

*Intersección*

$$\mu_{A \cap B} x = \min \mu_A x, \mu_B x \quad \forall x \in U \quad (2.13)$$

Es importante resaltar que el funcionamiento de estas operaciones básicas coincide con el de las correspondientes a las de la teoría clásica de conjuntos; es decir, la teoría clásica de conjuntos puede considerarse un caso particular de la borrosa si se reduce la incertidumbre a 0, y se admite sólo los valores de 0 y 1 para las funciones de pertenencia.

Como en la lógica clásica, se puede demostrar que las funciones  $\max(.)$  y  $\min(.)$  son las más restrictivas de todas las posibles. Por otro lado las operaciones de *dilatación* y *concentración* se conocen como *modificadores*, ya que permiten

formalizar el tipo de modificadores aplicados sobre un mismo término en el lenguaje común. Algunas operaciones adicionales se resumen a continuación:

*Igualdad*

$$\mu_A x = \mu_B x \quad x \in U \quad (2.14)$$

*Norma*

$$\mu_{Norma(A)} x = \frac{\mu_A x}{\max \mu_A x} \quad x \in U \quad (2.15)$$

*Concentración*

$$\mu_{Conc(A)} x = \mu_A x^2 \quad x \in U \quad (2.16)$$

*Dilatación*

$$\mu_{Dilat(A)} x = \mu_A x^{1/2} \quad x \in U \quad (2.17)$$

## 1.12 INFERENCIA BORROSA

También como en el caso de la lógica clásica, la borrosa se ocupa del razonamiento formal con proposiciones, pero a diferencia de ésta, los valores de las proposiciones pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso.

De la misma forma que se define un isomorfismo entre la lógica y la teoría de conjuntos clásica, es posible también definir un isomorfismo entre la lógica y la teoría de conjuntos borrosos, y de éstas a su vez con el álgebra de Boole. De esta forma, los conjuntos borrosos también representan predicados en la lógica proposicional. El objeto de la lógica borrosa es proporcionar un soporte formal al razonamiento basado en el lenguaje natural, que se caracteriza por tratarse de un razonamiento de tipo aproximado, que hace uso de unas proposiciones que a su vez, expresan información de carácter impreciso.

### 1.12.1 Principio de extensión

El principio de extensión permite convertir conceptos no borrosos en borrosos, siendo además la base de la inferencia en los sistemas borrosos. Sean  $U$  y  $V$  dos universos de discurso y  $f$  una función de  $U$  a  $V$ . En general, para un conjunto borroso  $A$  en  $U$  el principio de extensión define un conjunto borroso  $B$  en  $V$  dado por

$$\mu_B v = \sup_{u \in f^{-1} v} \mu_A u \quad (2.18)$$

es decir  $\mu_B v$  es el máximo de  $\mu_A u$  para todos los  $u \in U$  que cumplen que  $f u = v$ , donde  $v \in V$  y se supone que  $f^{-1} v$  no es vacío. Si  $f^{-1} v$  es vacío para algún  $v \in V$ , se define  $\mu_B v = 0$ .

### 1.12.2 Relación borrosa

Para dos universos de discurso  $U$  y  $V$ , una relación borrosa se define como un conjunto borroso  $R$  en el espacio  $U \times V$ , cuya función de inclusión se denota como  $\mu_R u, v$ , con  $u \in U$  y  $v \in V$ .

Puede definirse también la *composición Sup-Star*  $R \circ S$  para dos relaciones borrosas  $R$  y  $S$  en  $U \times V$  y  $V \times W$ , respectivamente, como otra relación borrosa con la siguiente función de inclusión.

$$\mu_{R \circ S} u, w = \sup_{v \in V} \mu_R u, v * \mu_S v, w \quad (2.19)$$

donde  $u \in U$ ,  $v \in V$  y  $w \in W$ , y el operador  $*$  puede ser cualquier *t-norma* definidas por:  $\min(a, b)$ ,  $ab$  o  $a * b = \max(0, a + b - 1)$ .

La relación *Sup-Star* es uno de los principios básicos para el desarrollo de un sistema de inferencia borrosa.

### 1.12.3 *Modus Ponens Generalizado* y *Modus Tolens Generalizado*

Las reglas borrosas son básicamente de tipo SI-ENTONCES (IF-THEN) y expresan una relación o proposición borrosa. En lógica borrosa el razonamiento no es preciso, sino aproximado, lo cual quiere decir que se puede inferir de una regla una conclusión aunque el antecedente (premisa) no se cumpla plenamente. Existen dos métodos básicos de inferencia entre reglas o *leyes de inferencia*, el *modus ponens generalizado* (GMP) y el *modus tolens generalizado* (GMT), que representan extensiones o generalizaciones del razonamiento clásico. El GMP se conoce como *razonamiento directo* y puede resumirse de la forma siguiente:

|              |                                   |
|--------------|-----------------------------------|
| Conocimiento | SI $x$ es $A$ ENTONCES $y$ es $B$ |
| Hecho        | $x$ es $A'$                       |
| Consecuencia | $y$ es $B'$                       |

donde  $A$ ,  $A'$ ,  $B$  y  $B'$  son conjuntos borrosos.

El GMT se conoce como *razonamiento inverso* y puede resumirse de la forma siguiente:

|              |                                   |
|--------------|-----------------------------------|
| Conocimiento | SI $x$ es $A$ ENTONCES $y$ es $B$ |
| Hecho        | $y$ es $B'$                       |
| Consecuencia | $x$ es $A'$                       |

### 1.12.4 Implicación borrosa

Si se definen dos conjuntos borrosos  $A$  y  $B$  en  $U$  y  $V$ , respectivamente, una *implicación borrosa* de  $A$  en  $B$  que se indica con  $A \rightarrow B$ , es una relación borrosa



en  $U \times V$ , que puede venir definida por alguna de las siguientes funciones de inclusión empleadas en la literatura de lógica borrosa:

*Conjunción borrosa*

$$\mu_{A \rightarrow B} u, v = \mu_A u * \mu_B v \quad (2.20)$$

*Disyunción borrosa*

$$\mu_{A \rightarrow B} u, v = \mu_A u \dot{+} \mu_B v \quad (2.21)$$

*Implicación material*

$$\mu_{A \rightarrow B} u, v = \mu_A u \dot{+} \mu_B v \quad (2.22)$$

*Cálculo proposicional*

$$\mu_{A \rightarrow B} u, v = \mu_A u \dot{+} \mu_{A * B} v \quad (2.23)$$

*Modus ponens generalizado*

$$\mu_{A \rightarrow B} u, v = \sup c \in [0,1] \mu_A u * c \leq \mu_B v \quad (2.24)$$

*Modus tolens generalizado*

$$\mu_{A \rightarrow B} u, v = \inf c \in [0,1] \mu_B v \dot{+} c \leq \mu_A u \quad (2.25)$$

### 1.13 REGLAS BORROSAS

Las reglas borrosas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada, llamados *antecedentes* o *premisas*, y les asocian un conjunto borroso de salida, llamado *consecuente* o *consecuencia*. Los conjuntos borrosos de la premisa se asocian mediante conjuntivas lógicas como *y*, *o*, etc.

Las reglas borrosas permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de forma completa normalmente se precisa de varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como una *base de reglas*, es decir, el conjunto de reglas que expresan las relaciones conocidas entre antecedentes y consecuentes.

La base de reglas se puede representar bien como una tabla de las reglas que la forman, o bien como una *memoria asociativa borrosa* o *FAM*. Las FAM son

matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas. Las FAM permiten realizar una representación gráfica clara de las relaciones entre dos variables lingüísticas de entrada y la variable lingüística de salida, pero requiere que se indique explícitamente todas las reglas que se pueden formar con estas dos variables de entrada. Cuando el número de conjuntos de cada una de las particiones de entrada crece las FAM se hacen difícilmente manejables. Es posible también definir FAM de más de dos dimensiones, pero su tamaño se hace rápidamente excesivo y son más difíciles aún de manejar. En su lugar se suele trabajar con varias FAM de dimensión dos, para así definir subconjuntos de reglas que asocien las entradas de dos en dos en la base de reglas general.

Formalmente, una *base de reglas borrosas* es una colección de reglas  $R^l$  con el formato

$$R^l : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l \quad (2.26)$$

Donde  $F_i^l$  y  $G^l$  son conjuntos borrosos en  $U_i \subset \mathfrak{R}$  y  $V \subset \mathfrak{R}$ , respectivamente, y  $\mathbf{x} = x_1, \dots, x_n^T \in U_1 \times \dots \times U_n$  e  $y \in V$  son variables lingüísticas. Este formato de reglas se conoce como *borroso puro* o de *tipo Mamdani*, por ser primero quien las propuso en 1974. Otro formato frecuente para las reglas es el llamado de *tipo Sugeno*. En este caso, la función de salida es una combinación lineal de las variables de entrada, o en un caso más general, una función genérica de las variables de entrada.

$$R^l : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y^l \text{ is } f^l \mathbf{x} \quad (2.27)$$

Si se llama  $M$  al número de reglas *IF-THEN* de la base de reglas entonces  $l = 1, 2, \dots, M$  en las ecuaciones 2.26 y 2.27. El vector  $\mathbf{x}$  representa el conjunto de las entradas, mientras que  $y$  es la salida del sistema borroso. Los sistemas borrosos descritos con  $n$  entradas  $x_i$  y una sola salida  $y$ , se conoce como **MISO** (*Multiple Input Single Output*), mientras que los que tienen varias salidas (de 1 hasta  $k$ ) se conocen como **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*). Para estos últimos sistemas, se pueden generalizar el formato anterior de las reglas, o bien descomponerlo en  $k$  sistemas de tipo MISO.

## 1.14 DISPOSITIVOS DE INFERENCIA BORROSA

Se llaman *dispositivos de inferencia borrosa* a los sistemas que interpretan las reglas del tipo *IF-THEN* de una base de reglas, con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema. En un sistema borroso las reglas del tipo de la ecuación 2.26 se interpretan como una implicación borrosa de  $F_1^l \times \dots \times F_n^l \rightarrow G^l$  en  $U \times V$ , con  $U \equiv U_1 \times \dots \times U_n \subset \mathfrak{R}^n, V \subset \mathfrak{R}$ . Si se llama  $A'$  a la entrada en  $V$  utilizando la composición Sup-Star (Ecuación 2.28).

$$\mu_{B^l} y = \sup_{x \in U} \mu_{F_1^l \times \dots \times F_n^l \rightarrow G^l} x, y * \mu_{A'} x \quad (2.28)$$

Se pueden proponer seis interpretaciones de la ecuación 2.28, para la ejecución de la implicación borrosa definida por una regla del tipo de la ecuación 2.26. Para simplificar las ecuaciones siguientes se llamarán  $F_1^l \times \dots \times F_n^l \equiv A$  y  $G^l \equiv B$ , con lo que la ecuación 2.26 puede expresarse simplemente como  $A \rightarrow B$ .

*Implicación borrosa por la regla del mínimo*

$$\mu_{A \rightarrow B} x, y = \min \mu_A x, \mu_B y \quad (2.29)$$

*Implicación borrosa por la regla del producto*

$$\mu_{A \rightarrow B} x, y = \mu_A x \mu_B y \quad (2.30)$$

*Implicación borrosa por la regla aritmética*

$$\mu_{A \rightarrow B} x, y = \min 1, 1 - \mu_A x + \mu_B y \quad (2.31)$$

*Implicación borrosa por la regla max-min*

$$\mu_{A \rightarrow B} x, y = \max \min \mu_A x, \mu_B y, 1 - \mu_A x \quad (2.32)$$

*Implicación borrosa por la regla Booleana*

$$\mu_{A \rightarrow B} x, y = \max 1 - \mu_A x, \mu_B y \quad (2.33)$$

*Implicación borrosa por la regla de Goguen*

$$\mu_{A \rightarrow B} x, y = \begin{cases} 1 & \mu_A x \leq \mu_B y \\ \frac{\mu_B y}{\mu_A x} & \mu_A x > \mu_B y \end{cases} \quad (2.34)$$

En las ecuaciones anteriores aparece el término  $\mu_A \mathbf{x} = \mu_{F_1^l \times \dots \times F_n^l} \mathbf{x}$ , que a su vez puede ser definido por la regla del mínimo

$$\mu_{F_1^l \times \dots \times F_n^l} \mathbf{x} = \min \mu_{F_1^l} \mathbf{x}, \dots, \mu_{F_n^l} \mathbf{x} \quad (2.35)$$

o por la regla del producto

$$\mu_{F_1^l \times \dots \times F_n^l} \mathbf{x} = \mu_{F_1^l} \mathbf{x} \dots \mu_{F_n^l} \mathbf{x} \quad (2.36)$$

Para concluir, la *salida final* de un dispositivo de inferencia borrosa puede consistir en:

- a)  $M$  conjuntos borrosos  $B^l$ , con  $l = 1, 2, \dots, M$ , según la ecuación 2.28, cada uno de los cuales es el resultado de aplicar la entrada  $A'$  a cada una de las  $M$  reglas de la base de reglas.
- b) Un único conjunto borroso  $B'$ , que es la unión de los  $M$  conjuntos borrosos  $B^l$  calculado según

$$\mu_{B'} y = \mu_{B^1} y \dot{+} \dots \dot{+} \mu_{B^M} y \quad (2.37)$$

- c)  $M$  escalares  $y^l$ , con  $l = 1, 2, \dots, M$ , si las reglas son del tipo Sugeno, según la ecuación 2.27, cada uno de los cuales es el resultado de aplicar la entrada  $A'$  a cada una de las  $M$  reglas de la base de reglas.

## 1.15 FUSIFICACIÓN

La fusificación se establece como una relación entre puntos de entrada no borrosos al sistema  $\mathbf{x} = x_1, \dots, x_n^T$ , y sus correspondientes conjuntos borrosos  $A$  en  $U$  (las variables procedentes del exterior serán, en general, valores no borrosos, y habrá que borrosificarlas previamente).

### 1.15.1 Fuzificación singleton

Es el método de fusificación más utilizado, principalmente en sistemas de control, y consiste en considerar los propios valores discretos como conjuntos borrosos.

De otra forma, para cada valor de entrada  $x$  se define un conjunto  $A'$  que lo soporta, con función de pertenencia  $\mu_{A'} x'$ , de modo que  $\mu_{A'} x = 1$ ,  $x' = x$ , y  $\mu_{A'} x' = 0$ , para todos los otros  $x' \in U$  en los que  $x' \neq x$ .

### 1.15.2 Fuzificación no singleton

En este método de borrosificación se utiliza una función exponencial del tipo siguiente

$$\mu_{A'} x' = a \cdot \exp - \frac{x' - x}{\sigma}^2 \quad (2.38)$$

función con forma de campana, centrada en el valor  $x$  de entrada, de anchura  $\sigma$  y amplitud  $a$ .

## 1.16 DEFUSIFICACIÓN

La defusificación es la función que transforma un conjunto borrosos en  $V$ , normalmente salida de un dispositivo de inferencia borrosa, en un valor no borroso  $y \in V$ . Para esta tarea se utilizan diversos métodos:

### 1.16.1 Defusificación por máximo

Definido como

$$y = \operatorname{argsup}_{y \in V} \mu_{B'} y \quad (2.39)$$

es decir,  $y$  es el punto de  $V$  en que  $\mu_{B'} y$  alcanza su valor máximo, donde  $\mu_{B'} y$  está definido según la ecuación 2.37 (la unión de los  $B'$  de salida).

### 1.16.2 Defusificación por media de centros

Definido como

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \mu_{B^l}(y)}{\sum_{l=1}^M \mu_{B^l}(y)} \quad (2.40)$$

donde  $y^l$  representa el centro del conjunto borroso  $G^l$  (definido como el punto de  $V$  en el que  $\mu_{G^l}$  alcanza su valor máximo), y  $\mu_{B^l}(y)$  está definido según la ecuación 2.28.

### 1.16.3 Defusificación por centro de área

Definido como

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M M^l y^l \mu_{B^l}(y)}{\sum_{l=1}^M A^l \mu_{B^l}(y)} = \frac{\sum_{l=1}^M \int_V \mu_{B^l}(y)^2 dy \cdot M^l y^l \mu_{B^l}(y)}{\sum_{l=1}^M \int_V \mu_{B^l}(y) dy} \quad (2.41)$$

donde  $M^l$  es el momento (en torno al eje  $y$  del universo de discurso de la salida  $V$ ) de la función de inclusión del conjunto borroso  $G^l$ ,  $A^l$  es el área, y  $\mu_{B^l}(y)$  está definido según la ecuación 2.28.

Estos métodos de desborrosificación son los empleados para obtener el valor de salida no borrosa de un dispositivo de inferencia borrosa que utiliza reglas de tipo Mamdani. Si las reglas utilizadas son del tipo Sugeno, el valor de salida no borrosa se obtiene como media ponderada de las salidas de cada regla de la base de reglas según

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \mu_{A^l}(x)}{\sum_{l=1}^M \mu_{A^l}(x)} \quad (2.42)$$

donde  $y^l$  es la salida de la regla  $l$ , y el término  $\mu_{A^l}(x)$  se calcula utilizando 2.35 o 2.36. Este valor  $y^l$  de la salida de una regla del tipo Sugeno se calcula frecuentemente como una combinación lineal de las entradas:

$$y^l = f_l(\underline{x}) = a_{l,0} + \sum_{i=1}^n a_{l,i} x_i \quad (2.43)$$

## **1.17 DESARROLLO DE SISTEMAS BORROSOS**

Tras describir el amplísimo abanico de posibilidades para los distintos aspectos de un sistema borroso, se exponen algunas de las elecciones más comunes. La selección de los detalles concretos de implementación del sistema borroso dependerá de diversos condicionantes. Hablando en términos generales, los principales son:

### **1.17.1 Eficiencia computacional**

Para problemas complejos, con muchas variables lingüísticas o muchas reglas, o en realizaciones en microcontroladores de poca capacidad de cálculo y poca memoria, resulta fundamental seleccionar métodos que no requieran muchos cálculos o mucha memoria. Así, son preferibles en este caso funciones de inclusión triangulares o trapezoidales frente a las exponenciales, y el cálculo de máximos frente a multiplicaciones. Además, las funciones de inclusión de tipo singleton para la salida producen sistemas más simples, aunque son más sensibles al ruido de las entradas.

### **1.17.2 Facilidad de adaptación**

En aplicaciones en las que se requiere que el sistema pueda realizar aprendizaje puede ser necesario que la función de salida  $y = f(x)$  sea derivable respecto de los parámetros que se han de ajustar. En este caso, por el contrario, son preferibles funciones de inclusiones exponenciales frente a las triangulares o trapezoidales, y las multiplicaciones frente al cálculo de máximos.

### 1.17.3 Opciones más habituales en el desarrollo de sistemas borrosos

Se exponen a continuación algunas de las opciones más utilizadas para el diseño de sistemas borrosos.

- a) Un sistema de lógica borrosa con desborrosificador por media de centros (ecuación 2.40), implicación borrosa por la regla del producto (2.30 y 2.36), y borrosificador singleton, produce la siguiente función de salida

$$f \mathbf{x} = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l} x_i}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l} x_i} \quad (2.44)$$

Donde  $y^l$  es el centro del conjunto borroso  $G^l$  (el punto de  $V$  en que  $\mu_{G^l} y$  alcanza su máximo valor, que se asume como  $\mu_{G^l} y = 1$ ).

- b) Un sistema de lógica borrosa con desborrosificador por media de centros (ecuación 2.40), implicación borrosa por la regla del mínimo (2.29 y 2.35), y borrosificador singleton, produce la siguiente función de salida

$$f \mathbf{x} = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \min \mu_{F_1^l} x_1, \dots, \mu_{F_n^l} x_n}{\sum_{l=1}^M \min \mu_{F_1^l} x_1, \dots, \mu_{F_n^l} x_n} \quad (2.45)$$

donde  $y^l$  es, de nuevo, el centro del conjunto borroso  $G^l$ .

Como se ha indicado antes, en aplicaciones en las que se requiere que el sistema posea capacidad de aprendizaje puede resultar necesario que la función de salida  $y = f \mathbf{x}$  sea derivable respecto de los parámetros que se han de ajustar. Una elección frecuente en este caso es el empleo de funciones de inclusión gaussianas.

$$\mu_{F_i^l} x_i = a_i^l \exp - \frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}^2 \quad (2.46)$$

donde  $a_i^l$  y  $\sigma_i^l$  son los parámetros que dan la forma concreta de la gaussiana (amplitud y anchura, respectivamente). A partir de este tipo de función de pertenencia puede obtenerse el sistema borroso.



- c) Un sistema de lógica borrosa con desborrosificador por media de centros (ecuación 2.40), implicación borrosa por la regla del producto (2.30 y 2.36), y borrosificador singleton con funciones de tipo gaussiano, produce la siguiente función de salida

$$f_{\mathbf{x}} = \frac{\prod_{l=1}^M y^l \prod_{i=1}^n a_i^l \exp - \frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}{}^2}{\prod_{l=1}^M \prod_{i=1}^n a_i^l \exp - \frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}{}^2} \quad (2.47)$$

Este sistema es uno de los más utilizados en sistemas con entrenamiento. Los parámetros de este sistema son  $y^l$ ,  $a_i^l$ ,  $x_i^l$  y  $\sigma_i^l$ , que suelen estar sometidos a ciertas restricciones:  $y^l \in V$ ,  $a_i^l \in [0,1]$ ,  $x_i^l \in U_i$  y  $\sigma_i^l > 0$ .

## 1.18 BORROSIDAD Y PROBABILIDAD

Se ha de evitar desde el principio confundir la función de pertenencia de un conjunto borroso con una función de densidad de probabilidad. Debe tenerse siempre presente que la función de pertenencia de un conjunto borroso indica hasta qué punto cierto valor de una magnitud puede ser incluido en un conjunto borroso, mientras que la probabilidad por su parte, indica la frecuencia con que los diversos valores de una magnitud se presentan.

Explicándolo con el clásico ejemplo de la botella, la función de pertenencia indica el grado en que podemos incluir una cierta botella dentro del conjunto de las *botellas vacías* y en el de las *botellas llenas*, mientras que la probabilidad nos informa sobre cuántas botellas de las encontradas se pueden incluir en cada uno de dichos conjuntos. Una probabilidad 0.33 de *botellas vacías* indica que de cada 100 botellas que se tomen 33 estarán vacías, mientras que una pertenencia de 0.33 al conjunto *botellas vacías* indicará que la botella incluye un tercio de litro del líquido de que se trate (supuesta una botella de un litro de capacidad).

Aunque muchas de las expresiones matemáticas de la lógica borrosa son similares a otras del campo de la probabilidad, su sentido es bien distinto. Las funciones de pertenencia a un conjunto son fijadas arbitrariamente por el observador, indicando el significado que éste asigna a cada una de las variables lingüísticas que definen los conjuntos. Por el contrario, la probabilidad se determina por la observación de la ocurrencia de los valores de una magnitud, en algunos casos se realiza la medida de esta probabilidad, y en otros se supone un modelo y se comprueba su validez.

## 1.19 SISTEMAS DE CONTROL BORROSO

### 1.19.1 Introducción al control borroso

Los sistemas expertos de control borroso basados en reglas, conocidos como *controladores borrosos* o FLC (*Fuzzy Logic Controllers*), o también, *sistemas de inferencia borrosa* o FIS (*Fuzzy Inference Systems*), son sin duda la aplicación más extendida de la lógica borrosa.

El control difuso, puede ser expresado mejor como un control a través de palabras que interpretan el sentido común, en lugar de números o bien sentencias en lugar de ecuaciones. Sin embargo, las variables de los procesos no se miden en sentido común, sino en números. Por lo tanto se hace necesario realizar una adaptación previa antes de introducir el estado de la variable al controlador. Esta etapa se llama *fusificación*. En la figura 2.1, se aprecian las distintas transformaciones que sufren las variables y los datos en un lazo de control difuso.

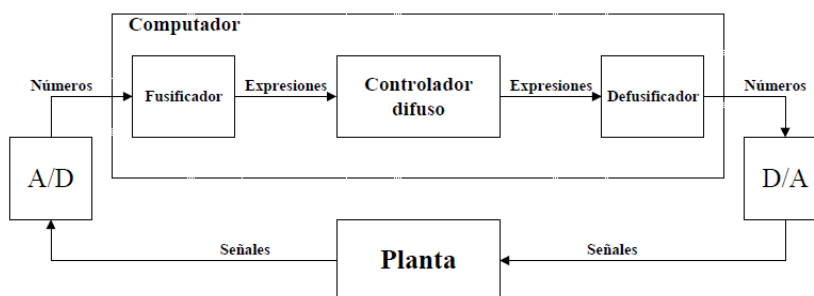


Figura 2. 8 Lazo de control difuso. Fuente: Propia

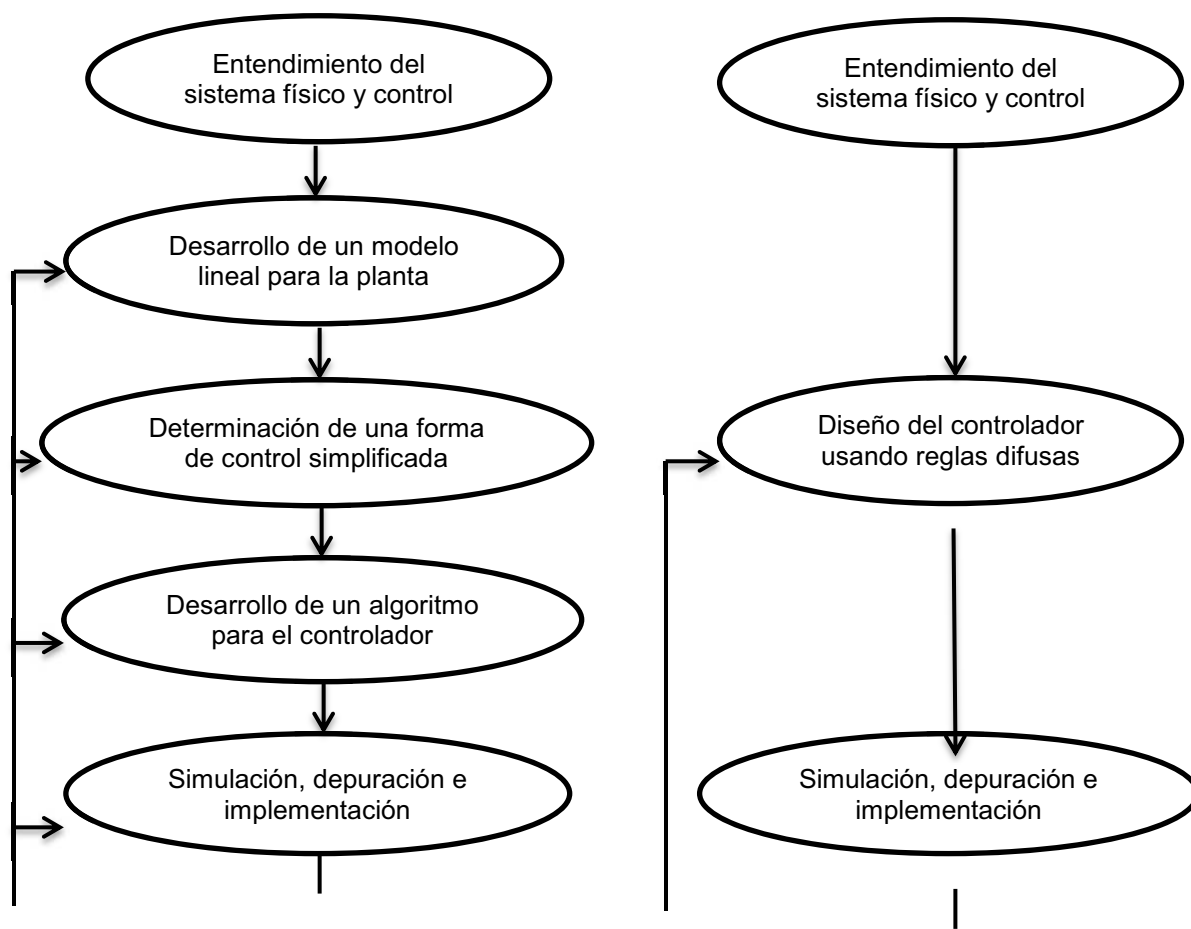
La etapa de fusificación, le otorga a los datos de entrada un grado de membrecía dentro de las distintas expresiones posibles, y las funciones de pertenencia definidas para tal propósito. Desde luego, para un determinado valor de una variable, su grado de pertenencia será mayor en una expresión que en las demás. Una vez que se tienen expresados los estados de las variables en forma lingüística se pueden establecer relaciones lógicas entre ellas, típicamente a través de reglas tales como *si...entonces* (IF-THEN). Se definen una serie de relaciones que interpretan el sentido común, y permiten generar una actuación deseada (en estado lingüístico), que debe ser aplicada a la planta. Luego esta debe ser traducida a número (*defusificación*), para que luego el conversor digital-análogo la convierta a señal de tal modo que pueda ser aplicada a la planta.

## 1.20 CONTROL PID VS CONTROL DIFUSO

Un sistema de control embebido (embedded control system) basado en lógica difusa es una muestra para un diseño alternativo que puede desempeñarse en sistemas lineales y no-lineales. La secuencia empleada para el desarrollo de un controlador convencional y un difuso se exhiben en la figura 2.9.

A fin de apreciar porque un sistema basado en metodología difusa es muy atractivo para una aplicación de control embebido se examina un típico diagrama de flujo para un sistema convencional y uno basado en lógica difusa.

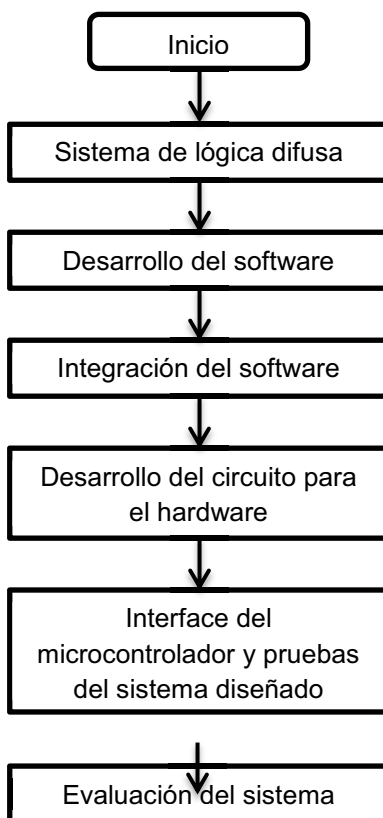
Usando el enfoque convencional, el primer paso es entender el sistema físico y sus requerimientos de control. Basado en este entendimiento, el segundo paso es desarrollar un modelo, el cual incluye la planta, sensores y actuadores. El tercer paso es usar la teoría de control para sistemas lineales ara determinar una versión simplificada para el controlador, tales como los parámetros de un controlador PID. El cuarto paso consiste en hacer un algoritmo para el controlador simplificado. Por último, se debe simular el diseño incluyendo los efectos de no-linealidad, ruido y parámetros de variación. Si el desempeño no es satisfactorio será necesario modificar el modelo del sistema, rediseñar el controlador, reescribir el algoritmo y volver a intentar.



**Figura 2. 9** Diseño convencional vs diseño de un controlador con lógica difusa. Fuente: Propia

El algoritmo PID consiste de tres modos básicos, el proporcional, el integral y el derivativo y cuando se usa esta técnica de control clásico, es necesario decidir cuales modos serán usados (P, I o D) y especificar los parámetros o ajustes para cada uno de esos modos. Generalmente los algoritmos básicos usados son P, PI o PID, y existiendo una amplia variedad de formas y métodos de ajuste de este esquema de control. Sin embargo, a medida que se exige una mayor precisión en el sistema, el ajuste de este tipo de control se hace más difícil sobre todo por el ruido y cuando se presentan retardos, además cuando los procesos a controlar son no lineales y el control debiera tener la capacidad de compensar esas no-linealidades, el control PID no tiene la capacidad de responder a esto porque asume relaciones lineales.

El estudio de un controlador basado en lógica difusa incluye varias fases [10], estas son: sistema lógico difuso, desarrollo del software, integración del software y del hardware (microcontrolador), desarrollo del hardware (circuito electrónico), y la interfaz entre el microcontrolador con el hardware que incluye la prueba y evaluación del sistema. Los detalles de esta descripción se muestran en la figura 2.10.



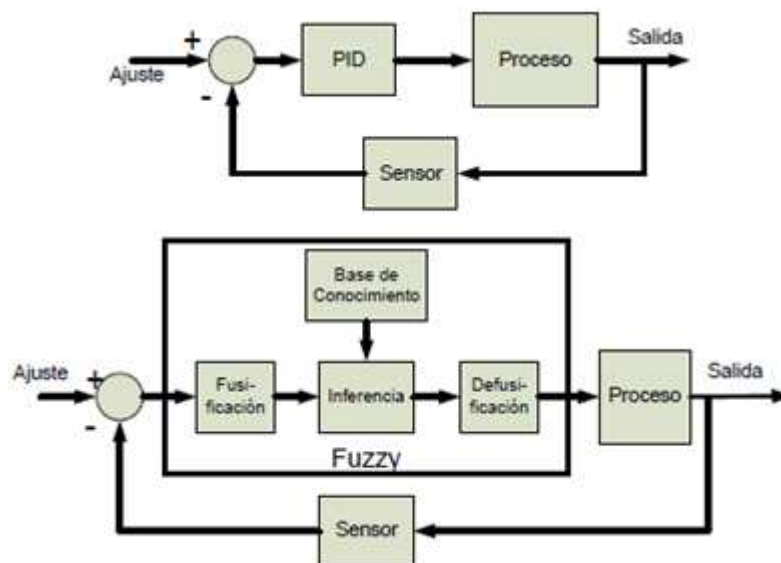
**Figura 2. 10** Etapas para el diseño de un controlador con lógica difusa. Fuente: Propia

El control lógico difuso surgió como una herramienta de control de procesos industriales complejos, radicando su importancia en que permite responder a valores intermedios, de variables, pasando de las opciones tradicionales de “frío/caliente”, “alto/bajo”, a opciones como “tibio” y “medio” por ejemplo, haciendo que los sistemas se acerquen a la forma de trabajar del cerebro humano. Por lo anterior, el diseño de controladores PID basados en lógica difusa, es motivado por la habilidad de estos de capturar estrategias cualitativas de control y ofrecer un comportamiento de control altamente flexible. Con esta forma de control, se

puede lograr que los sistemas puedan ajustarse a condiciones cambiantes en ocasiones imposibles de predecir, lógico, dentro de ciertos rangos.

En un sistema controlado por lógica difusa, el valor de entrada proveniente de los sensores, es convertido a un valor difuso mediante un proceso llamado fusificación. A continuación, ese valor es introducido a un proceso también lógico difuso llamado “Mecanismo de Inferencia”, en donde continuamente es evaluado mediante un conjunto de reglas, provenientes generalmente del conocimiento de un experto o elaboradas de manera empírica; este proceso produce un valor de salida también difuso, el cual es transformado a una salida real, a través de un proceso llamado “Defusificación”.

El valor de la salida del proceso de defusificación es utilizado como señal de control o como entrada a un actuador que es en realidad, quien se encarga de ajustar la salida del sistema. Los cambios en el sistema son medidos por los sensores y el proceso se repite nuevamente.



**Figura 2. 9** Control PID vs control Borroso. Fuente: Propia

Un control PID se basa en un modelo matemático riguroso de algún proceso lineal o lineal dentro de un rango. Si no es posible desarrollar el modelo matemático de la planta se puede optar por métodos de Identificación de Sistemas para aproximar a modelos lineales. Pero no siempre es posible obtener modelos satisfactorios, en especial cuando la naturaleza de los sistemas es no-lineal.

El diseño del controlador puede ser realizado de una manera empírica (sin conocimiento del modelo), mediante el modelo de Ziegler-Nichols o algún derivado de este, y se pueden asignar los coeficientes proporcional, integral y derivativo del controlador del sistema.

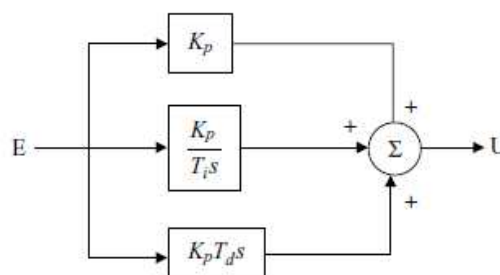
Un control PID lee un valor de entrada o del sensor de entrada, aplica los algoritmos de control, definidos y produce una salida específica como la señal actuante o como entrada a un actuador. La salida del sistema es medida por el sensor de entrada, y el proceso se repite indefinidamente.

Aunque a primera vista (Figura 2.9), el modelo PID puede parecer más simple, frecuentemente no es cierto. Los controladores difusos son en realidad más sencillos de realizar, más simples de describir, más rápidos de aplicar y pueden ofrecer mayor exactitud y mejor rechazo a perturbaciones en algunos casos.

Ambos tipos de control pueden ser ajustados sin el conocimiento previo del sistema, esto es, su ajuste se realiza sin conocer los verdaderos parámetros del sistema por lo que en este aspecto son muy similares y de ahí que sean tan utilizados. El control PID clásico tiene la forma:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Donde  $u(t)$  es la salida del controlador y  $e(t) = r(t) - y(t)$ , en la que  $r(t)$  es el valor de consigna (set-point) y  $y(t)$  es la salida de la planta.  $T_i$  y  $T_d$  son conocidas como la acción de tiempo integral y derivativa, respectivamente.



**Figura 2. 10** Control PID de tiempo-continuo. [12]

Tomando la transformada de Laplace de (3.1), se puede escribir la función de un PID de tiempo continuo como:

$$\frac{U}{E} \frac{1}{s} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.2)$$

donde

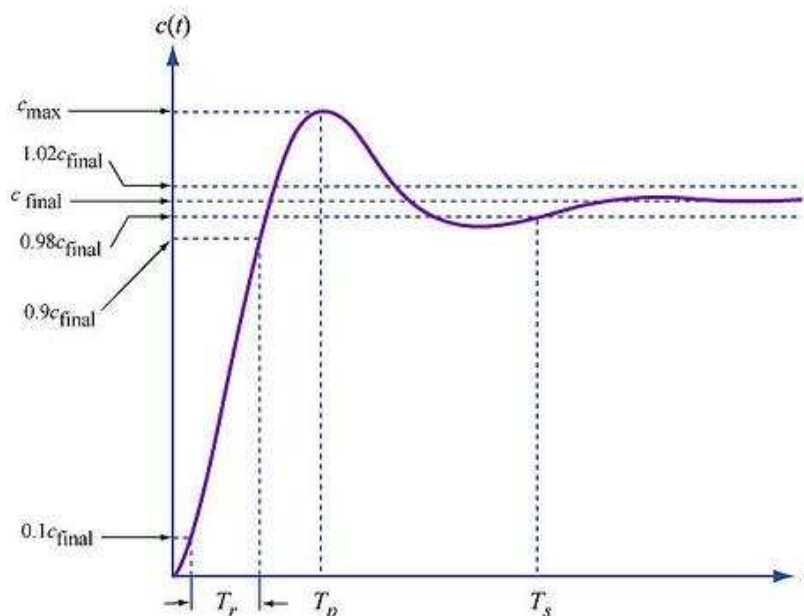
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad \text{y} \quad K_d = K_p T_d$$

Siendo uno de los controladores de más uso en la industria, sus características pueden resumirse como sigue:

*Proporcional:* el error es multiplicado por una ganancia  $K_p$ . Una ganancia muy alta puede causar inestabilidad, y una ganancia muy baja puede ocasionar que el sistema no sea controlable.

*Integral:* la integral del error es tomada y multiplicada por una ganancia  $K_i$ . La ganancia puede ser ajustada para llevar el error a cero en un tiempo determinado. Una ganancia muy alta puede causar oscilaciones y una muy baja puede ocasionar una respuesta demasiado lenta.

*Derivativo:* La derivada del error es multiplicada por una ganancia  $K_d$ . De nuevo, si la ganancia es demasiada alta el sistema puede oscilar, por el contrario, una ganancia muy baja puede ocasionar una respuesta lenta del sistema.



**Figura 2. 11** Características de un sistema de 2do orden. [12]

**Tabla 2. 1** Características de un sistema de 2do orden. Fuente: Propia



|       | Tiempo de levantamiento ( $T_r$ ) | Sobrepaso (%OS) | Tiempo de asentamiento ( $T_s$ ) | Error ( $e_{ss}$ ) |
|-------|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|
| $K_p$ | Disminuye                         | Aumenta         | Poco efecto                      | Disminuye          |
| $K_i$ | Disminuye                         | Aumenta         | Aumenta                          | Elimina            |
| $K_d$ | Poco efecto                       | Disminuye       | Disminuye                        | Poco efecto        |

## 1.21 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO

La inclusión de reglas difusas crea varios problemas extra de diseño, y a pesar de que muchos textos introductorios explican la teoría del control difuso, hay lineamientos concretos para ajustar los parámetros de un simple controlador difuso. La aproximación aquí mencionada está basada en la construcción de un controlador PID, la cual se puede sintetizar en tres pasos de procedimiento de diseño:

1. Iniciar con un controlador PID.
2. Insertar un controlador difuso lineal equivalente.
3. Hacerlo gradualmente no-lineal

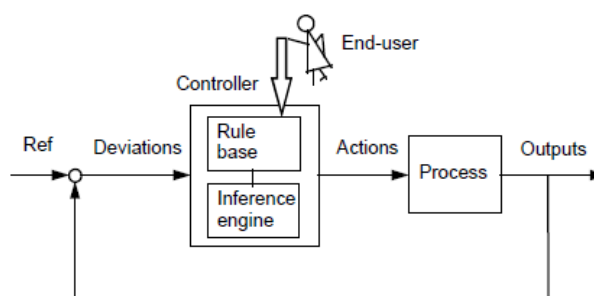
Las directrices relacionadas a los diferentes componentes del controlador difuso serán introducidas de a poco. En las siguientes tres secciones tres realizaciones simples de controladores difusos son descritas: un controlador a base de tablas, un mapa de entrada-salida y un controlador del tipo Takagi-Sugeno. La terminología está basada en el estándar internacional IEC 1996.

Los controladores difusos son usados tanto para controlar productos de los consumidores, por ejemplo: lavadoras, cámaras de video, y arroceras, así como procesos industriales, como hornos para cemento, trenes subterráneos y robots<sup>2</sup>. El control difuso es un método de control basado en la lógica difusa, la cual puede describirse simplemente como “calcular con palabras en vez de números”, por

<sup>2</sup> Jantzen J., *Design of Fuzzy Controller*, 1998.

otra parte, el control difuso puede ser descrito de manera simple como “control con oraciones en vez de ecuaciones”. Un controlador difuso puede incluir reglas empíricas, y que son especialmente muy usadas en la operación de plantas controladas.

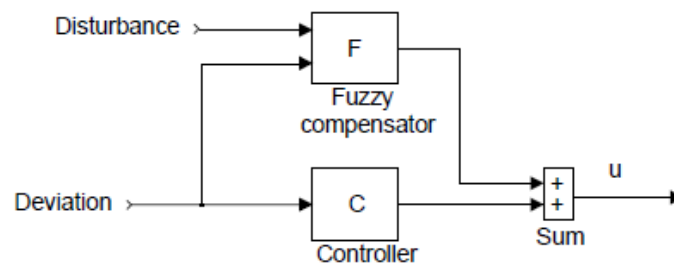
Los controladores difusos están siendo usados en varios esquemas de control. El más simple es el *control directo* o el control retroalimentado (*feedback control*), donde el controlador difuso está antes del proceso en un sistema de control retroalimentado (Figura 2.12).



**Figura 2. 12** Control directo. [10]

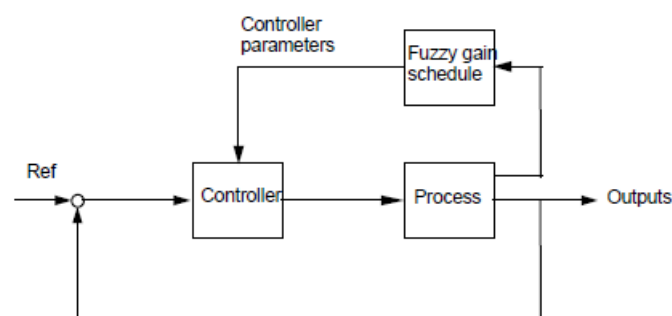
La salida del proceso es comparada con una referencia, y si hay una desviación (error), el controlador toma una acción de acuerdo a la estrategia de control. En la figura 2.12, las flechas pueden ser entendidas como hiper-flechas que contienen varias señales en el tiempo para múltiples lazos de control. Los subcomponentes de la figura 2.12 serán explicados en breve. El controlador aquí es un controlador difuso, y reemplaza a un controlador convencional, dígame un controlador PID (proporcional-integral-derivativo).

En el control alimentado hacia adelante (*feedforward control*) (Fig. 2.13) una perturbación medible está siendo compensada. Este tipo de control requiere un buen modelo, pero si un modelo matemático es difícil o costoso de obtener, un modelo difuso puede llegar a ser muy útil. La Figura 2.13 muestra un controlador y un compensador difuso, el proceso y el ciclo de retroalimentación son omitidos por claridad. El esquema, sin tener en cuenta la perturbación de entrada, puede ser concebido como una colaboración de acciones lineal y no lineal de control. El controlador C puede ser un controlador PID lineal, mientras que el controlador difuso F es un controlador no-lineal suplementario.



**Figura 2. 13** Feedforward control. [10]

Las reglas difusas son también usadas para corregir los parámetros de sintonización en sistemas de control adaptivo (Figura 2.14). Si una planta no-lineal cambia su punto de operación, es posible cambiar los parámetros del controlador de acuerdo a cada punto de operación. Esto se conoce como *ganancia programada (gain scheduling)* desde que fue originalmente usada para cambiar las ganancias de los procesos. Un controlador con ganancia programada contiene un controlador lineal cuyos parámetros son cambiados de acuerdo a una función del punto de operación en una forma preprogramada. Esto requiere un conocimiento total de la planta, pero a menudo es una buena forma para compensar variaciones de parámetros y no linealidades. Las medidas registradas por el sensor son usadas como variables programadas (*scheduling variables*) que gobiernan el cambio de los parámetros del controlador, a menudo por medio de una tabla look-up.



**Figura 2. 14** Parámetros difusos para control adaptivo. [10]

## 1.22 DISEÑO DEL LAZO DE CONTROL

Suponiendo que se desea controlar un sistema SISO<sup>3</sup> (de entrada y salida única). Resulta entonces conveniente utilizar como variables de entrada al controlador, el error existente en el proceso ( $e=r-y$ ), el cambio del error ( $de/dt$ ) y la acumulación de error ( $\int edt$ ), o mejor aún ingresar directamente variables como el sobrepaso, tiempo de levantamiento o tiempo de asentamiento. Luego cada una debe ser fusificada, es decir, se deben definir una cantidad de funciones de pertenencia que presenten los diferentes estados (lingüísticos) que pueden tomar estas variables (por ejemplo, error pequeño, mediano o grande). Para realizar este punto se dispone de una gran cantidad de funciones, tales como gaussianas, triangulares, trapecios, et. Según [10], el procedimiento para definir las funciones debe ser el siguiente:

- Se elige un número de funciones, de tal modo que se represente todos los estados que la variable tome.
- Se diseñan de un ancho mínimo suficiente que permita obviar el ruido de la medición.
- Se desea un cierto grado de cruzamiento entre las distintas funciones, para no incurrir en estados pobremente definidos.
- Se recomienda partir con funciones simétricas, para posteriormente realizar ajustes.
- Inicialmente se recomienda un entrecruzamiento del 50% de tal modo que cada elemento quede representado en al menos dos funciones.

Luego se deben definir las reglas base, cuya función es establecer una vinculación lógica entre los grados de pertenencia de las distintas variables de entrada, por ejemplo, si el error es grande y crece entonces se debe aplicar actuación correctiva grande. Se definen entonces todas las sentencias lógicas posibles, asignándoles a cada una de su actuación correspondiente. Luego, las actuaciones deben ser defusificadas, para ser convertidas a número, lo que se logra mediante diversos métodos, siendo el más utilizado el del centroide. El diagrama de la figura 2.15 muestra en forma esquemática el controlador difuso.

---

<sup>3</sup> Single Input Single Output

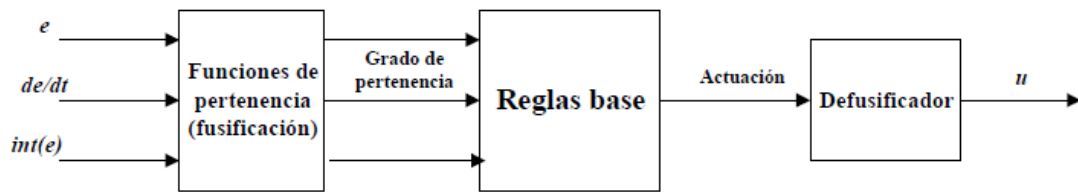


Figura 2. 15 Diagrama de control difuso. [11]

Sin embargo, a mayor cantidad de entradas, se tiene una mayor cantidad de reglas base, lo que dificulta crecientemente el diseño del controlador. Por ello, y siguiendo una sugerencia de [11], conviene retirar el factor integral de las entradas al controlador difuso, para incorporarlo en forma individual sumándolo a la actuación final. Se tiene entonces una especie de controlador híbrido en que el error y el cambio de error son variables de tipo difuso, y la acumulación del error es determinística (*crisp*). El cambio anterior queda ilustrado en la Figura 2.16.

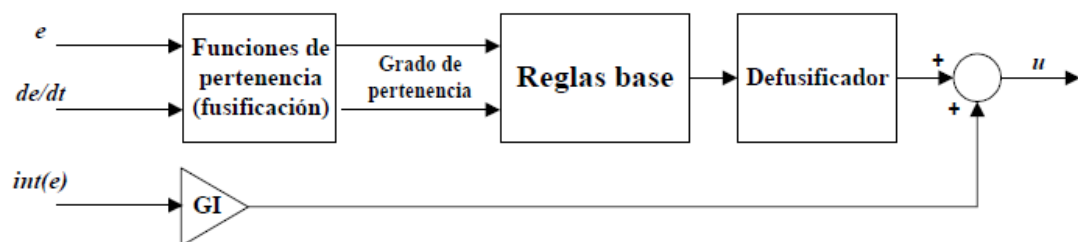
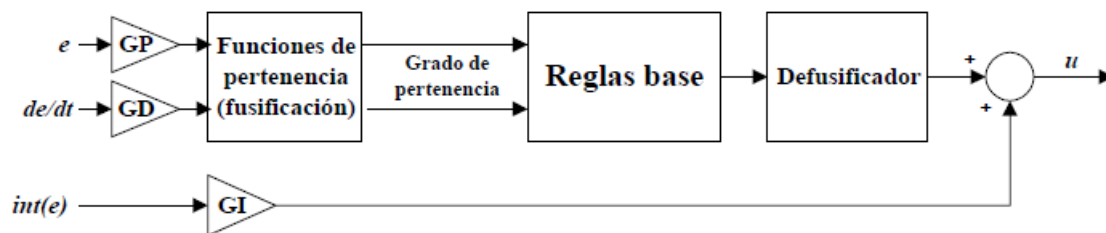


Figura 2. 16 Diagrama de control difuso modificado. GI es la ganancia del factor integral. [11]

### 1.22.1 Introducción de ganancias de ajuste

Con el método expuesto en el punto anterior, se obtiene un controlador, que no siempre asegura un rendimiento óptimo o deseado, dado que se diseñó en base a sentencias y conjuntos de naturaleza difusa. Ello significa, que de no estar conforme con el controlador diseñado, se debe realizar una reevaluación de todo el proceso efectuado (elección de funciones de pertenencia, reglas base, etc.) o en otras palabras, comenzar desde cero.

Para remediar este problema, en [11] se sugiere incorporar ganancias previas al proceso de fusificación, que permitan ponderar las variables de entrada de tal modo que se corrijan numéricamente las falencias de la interpretación difusa. Si además se relaciona esta idea con el control clásico, significa que se deben elegir las ganancias de forma análoga a los parámetros de sintonización de un controlador PID. Lo anterior queda ilustrado en la figura 2.17.



**Figura 2. 17** Diagrama de control difuso con ganancias. [11]

Se debe notar que en el caso de que las distintas ganancias sean unitarias se tendría el controlador original. Por ejemplo, al aumentar GP (ganancia del factor proporcional) por sobre 1, se estaría ponderando el error más fuertemente que la interpretación originalmente diseñada, provocando una actuación más rigurosa.

Algunos autores como [9] tienden a llamar este tipo de diseño como *Mecanismo de Adaptación*, cuyo objetivo es tratar de modificar la definición de reglas de inferencia específicas. Esta modificación debe hacerse con cuidado pues las definiciones de las etiquetas no deben ser arbitrarias y modificarlas demasiado puede suponer el significado lingüístico subyacente. Uno de los mejores métodos que se han utilizado para la modificación de los conjuntos difusos está basado en *algoritmos genéticos*.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO

#### 1.23 ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN EN CENTROS DE ESTUDIO

Para realizar el análisis de iluminación en un centro educativo, se tomó como modelo las aulas fabricadas por el DINSE que se hallan en muchas unidades educativas por todo el país. En algunos casos analizados nunca se advirtió un diseño correcto de iluminación, simplemente fueron construidas para maximizar la cantidad de alumnos y/o equipamiento en su interior.

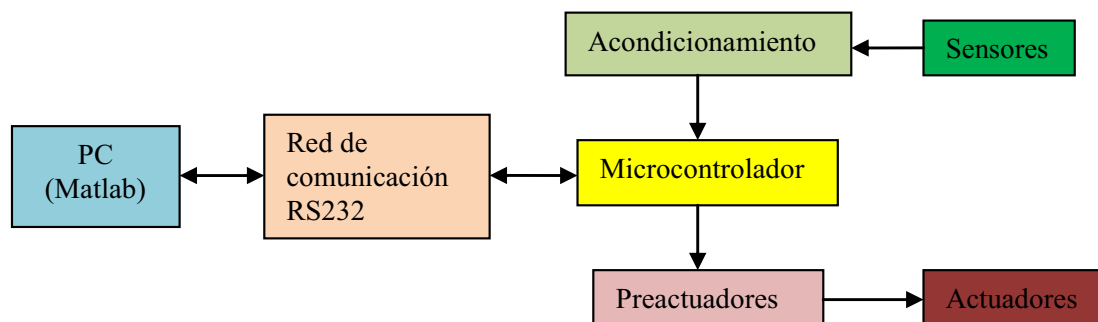


**Figura 3. 1** Bloque de aulas construido por el DINSE. Fuente: Propia

Las aulas tienen una medida de 12x6 metros y una altura de 2.75 metros. Para el cálculo de iluminación se dividió al aula en tres zonas tomando datos durante una semana (Ver Anexo 1)

#### 1.24 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El diagrama de bloques propuesto para el sistema de control de iluminación se ilustra en la Figura 3.2 a continuación,



**Figura 3. 2** Diagrama de bloques para el sistema de control de iluminación propuesto.

Fuente: Propia

Se proponen inicialmente dos ideas de sistemas de control. La primera toma como punto de partida un diseño arquitectónico del local acorde a las necesidades de los mismos. La norma INEN 1 152 establece las disposiciones generales y requisitos para la iluminación natural en viviendas, escuelas, oficinas y hospitales, determinando los valores mínimos de iluminación y su aplicación en la práctica. El artículo 4.2 establece que “Los niveles de iluminación necesarios para las diferentes tareas visuales se especifican en el Código de Práctica INEN para iluminación de Interiores. Si no se logra la cantidad requerida de iluminación con luz natural, será indispensable usar luz artificial complementaria para alcanzar los niveles de iluminación requeridos”. Es decir que no se han previsto circunstancias donde la iluminación pueda ser excesiva. Por tanto será necesario sólo controlar la intensidad luminosa de las lámparas.

Por otra parte, un segundo escenario es posible (puede darse en la mayoría de centros educativos) en el cual los edificios se construyen de forma que maximicen la cantidad de locales sin importar un diseño de correcta iluminación y mucho menos de ahorro energético. Entonces ocurrirá que en muchos lugares se requiera un nivel de iluminación regulable. Si la cantidad de luz es deficiente, el problema será resuelto con un aumento de la intensidad de las lámparas hasta lograr la referencia requerida. Sin embargo, cuando la cantidad de luz sea excesiva (por ejemplo si en un salón de clases con varias ventanas donde se va a usar computadores portátiles para reducir el contraste se prefiere bajar la



cantidad de luz) la acción de control será bajar la intensidad de las lámparas hasta que se apaguen, sin embargo es probable que aún haya exceso de luz, en tal circunstancia sólo resta disminuir la luz que ingresa por las ventanas mediante el uso de persianas o vidrios electrocrómicos (*switchable glass*)<sup>4</sup>.

Si bien las persianas son las más usadas en nuestro medio en especial por el costo inicial, el control de las mismas provocaría un mayor consumo energético, por tanto se recomendaría usar los vidrios electrocrómicos pues el control es muy simple a través de una señal de baja corriente. El inconveniente es su alto costo inicial.

En el presente proyecto el sistema de control posee las dos salidas, y el usuario tendría la ventaja de usar sólo la acción sobre la(s) lámpara(s) o sobre las lámparas y persianas (o vidrios electrocrómicos).

#### 1.24.1 Sensores de luz

Un sensor de luz es aquel que mide la cantidad de luz que sobre él incide y reporta la cantidad como un número o como una señal de salida. El principal componente de un sensor de luz es una fotoresistencia, cuya resistencia varía de acuerdo a la intensidad luminosa incidente.



**Figura 3. 3** Fotoresistencia (*Light-dependent resistor, LDR*). [8]

Un fotorresistor está hecho de un [semiconductor](#) de alta resistencia como el [sulfuro de cadmio](#), CdS. Si la luz que incide en el dispositivo es de alta [frecuencia](#), los [fotones](#) son absorbidos por la elasticidad del [semiconductor](#) dando a los

<sup>4</sup> Vidrios que tienen la capacidad de regular su opacidad en función de una corriente eléctrica aplicada al mismo. ([http://dreamglass.es/es/products\\_dg.html](http://dreamglass.es/es/products_dg.html))

[electrones](#) la suficiente energía para saltar la [banda de conducción](#). El electrón libre que resulta, y su hueco asociado, conducen la electricidad, de tal modo que disminuye la [resistencia](#). Los valores típicos varían entre 1 M $\Omega$ , o más, en la oscuridad y 100  $\Omega$  con luz brillante.

La variación del valor de la resistencia tiene cierto retardo, diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Esto limita a no usar los LDR en aplicaciones en las que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo. Esta lentitud da ventaja en algunas aplicaciones, ya que se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable un sensor (ej. tubo fluorescente alimentado por corriente alterna). En otras aplicaciones (saber si es de día o es de noche) la lentitud de la detección no es importante.

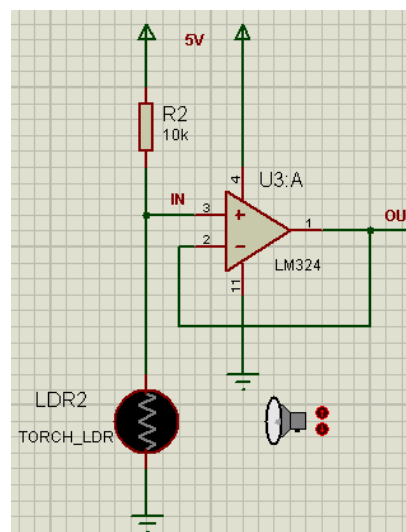
Se fabrican en diversos tipos y pueden encontrarse en muchos artículos de consumo, como por ejemplo en [cámaras](#), medidores de luz, relojes con radio, alarmas de seguridad o sistemas de encendido y apagado del alumbrado de calles.

#### 1.24.2 Acondicionamiento

Para llevar la señal registrada por el sensor hacia el microcontrolador y posteriormente al computador se debe acondicionarla, en este caso a un voltaje análogo de +5V DC. El circuito para el efecto puede apreciarse en la Figura 3.4 Aquí el amplificador operacional LM324, se conectó como seguidor de tensión, con realimentación negativa. Esta conexión tiene la ventaja de evitar pérdidas de señal y así no obtener resultados inesperados.

Como seguidor de voltaje se tiene que  $v_{in} = v_{out}$ . Los rangos de voltaje para este diseño han variado en un día normal desde 167.4 mV con mucha luz hasta 3.75V en la oscuridad. Sin embargo aplicando a la fotoresistencia una excesiva carga luminosa, por ejemplo con una lámpara directamente sobre la LDR o generando completa oscuridad tapando el sensor directamente es posible obtener valores que se hallan entre los 0V y los 5V. Esta señal antes de ingresar al algoritmo de

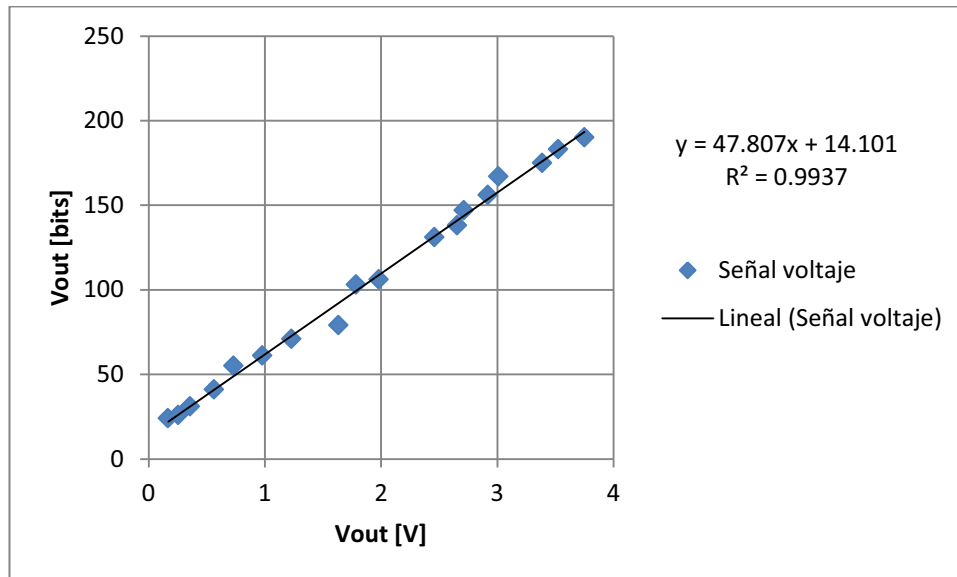
control programado en la PC debe modificarse o escalarse a un valor que sea más fácil de manipular. El microcontrolador trabaja con señales estándar de 8 bits, entonces se toma como referencia este rango binario que hace más fácil la transferencia de información y por ende de los cálculos matemáticos. Por tanto, el rango al que transformará el microcontrolador y lo enviará a la PC será de 0 (0 bits) a 255 (8 bits). La Figura 3.5 muestra los valores típicos en voltaje y en bits en los que el sensor de luz puede variar.



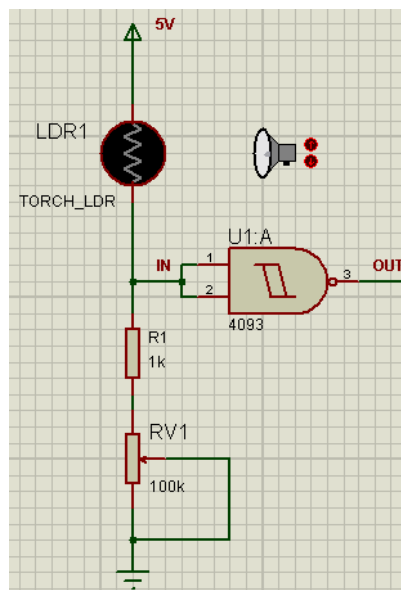
**Figura 3. 4** Circuito de acondicionamiento para la LDR. Fuente: Propia

Para que el controlador identifique entre día y noche se utilizó nuevamente una fotoresistencia pero con salida discreta. Debido a que la naturaleza de una LDR es analógica se acondiciona la señal de salida para obtener salidas de 0V o 5V (cero lógico o uno lógico, respectivamente) como se muestra en la Figura 3.6.

Para convertirla en señal digital se utilizó un disparador (trigger) Schmitt como el 4093 que tiene 6 disparadores inversores en su interior. Para el efecto se requiere sólo uno y mediante el potenciómetro RV1 de 100 k $\Omega$  se puede seleccionar el nivel de tensión (sensibilidad) para el disparo de la señal dependiendo de las necesidades. La lógica de funcionamiento es "1" a plena iluminación.



**Figura 3. 5** Relación voltaje de salida versus bits transmitidos. La no linealidad obedece a que el amplificador operacional no es ideal. Fuente: Propia



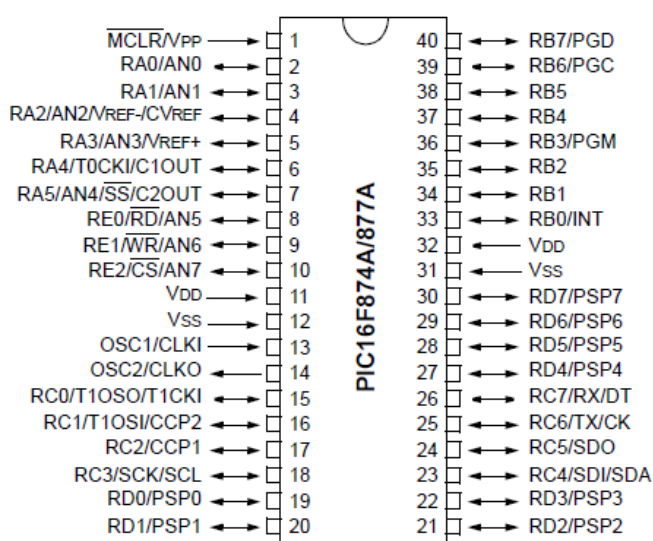
**Figura 3. 6** Circuito convertidor a señal digital mediante un *trigger Schmitt*. Fuente: Propia

### 1.24.3 Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado, en cuyo interior posee toda la arquitectura de un computador, esto es CPU, memorias RAM, EEPROM, y circuitos de entrada y salida. Son diseñados para reducir el costo económico y el

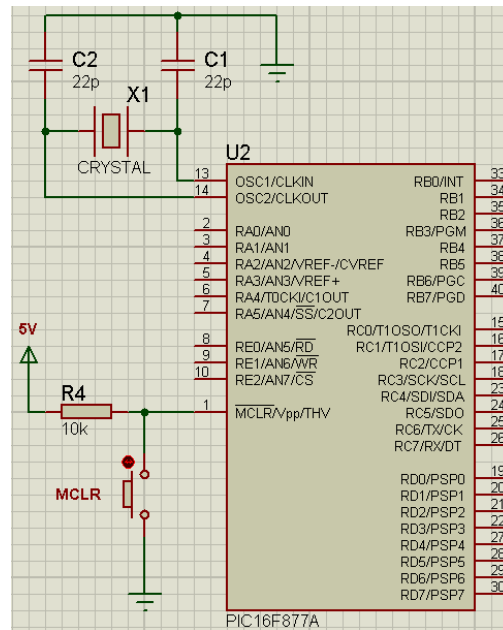
consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación.

Un microcontrolador de fábrica, no realiza tarea alguna, este debe ser programado. Un microcontrolador es capaz de realizar la tarea de muchos circuitos lógicos, conversores A/D y D/A, temporizadores, decodificadores, etc., simplificando todo el diseño a una placa de reducido tamaño y pocos elementos.



**Figura 3.7** Microcontrolador PIC 16F877A. [12]

Para realizar la interfaz entre la PC y los sensores o actuadores se utilizó un microcontrolador PIC (*Peripheral Interface Controller*) fabricados por MICROCHIP Technology INC. El modelo empleado fue el PIC16F877A, el cual se caracteriza por tener 40 pines, de los cuales 33 son puertos de entrada/salida, una memoria FLASH de 8192 palabras, una RAM de 368 bytes y una EEPROM de 256 bytes. Cabe recalcar que este PIC requiere un oscilador externo (X1) y una resistencia pull-up (R4) en su pin 1 para funcionar. Esto se ilustra en la Figura 3.8 Este microcontrolador posee un puerto completo (puerto A) que puede usarse como conversor A/D y además soporta comunicación serial tipo RS232.



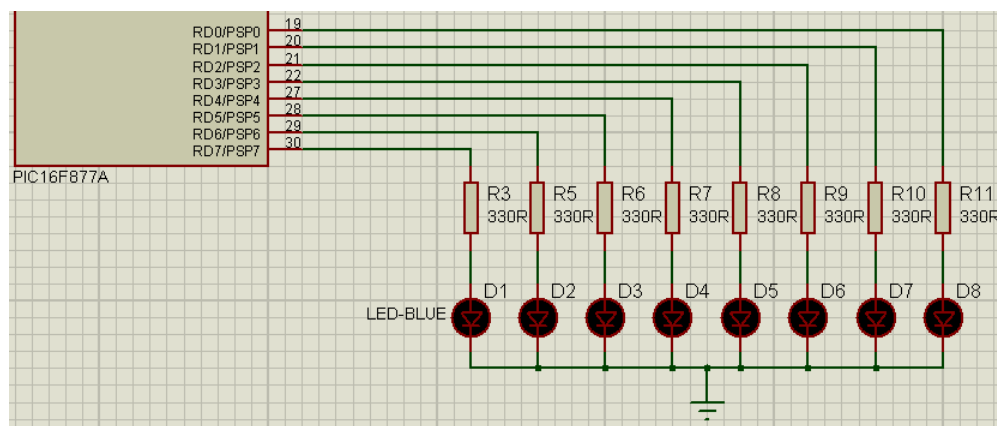
**Figura 3. 8** Conexión de oscilador (X1) y Reset (MCLR). Fuente: Propia

#### 1.2.4.4 Preactuadores

Una vez que se tiene el microcontrolador, es factible pensar en el tipo de actuador final. Para apoyar al objetivo de ahorrar energía se utilizarán como elemento final una lámpara basada en tecnología LED. Para la regulación de la misma se pueden seleccionar un control digital o analógico. En cualquiera de los dos casos el control difuso es adecuado. Para estudiar el comportamiento del control propuesto se ha efectuado una etapa de acondicionamiento de tipo discreto programada dentro del microcontrolador y la etapa de potencia se halla conectada directamente al microcontrolador por tratarse de elementos de muy baja potencia pero de alta luminosidad. Si las lámparas fuesen de mayor potencia se recomienda utilizar una etapa amplificadora con transistores o con triacs dependiendo si las lámparas trabajan con corriente continua o alterna, en ambos casos será necesario el microcontrolador para acondicionar mediante programación la señal de salida.

### 1.24.5 Actuadores o elementos finales de control

En el caso del prototipo quedan al menos tres puertos disponibles del microcontrolador que podrían usarse como salidas dependiendo de la configuración que se quiera dar al comando de los elementos finales de control. Para el control difuso propuesto se plantea el uso de una lámpara construida por 8 diodos LED usando el puerto B del PIC16F877A (Ver Figura 3.9). Entonces la cantidad de luz suministrada será proporcional al número de LEDs encendidos por el puerto D.



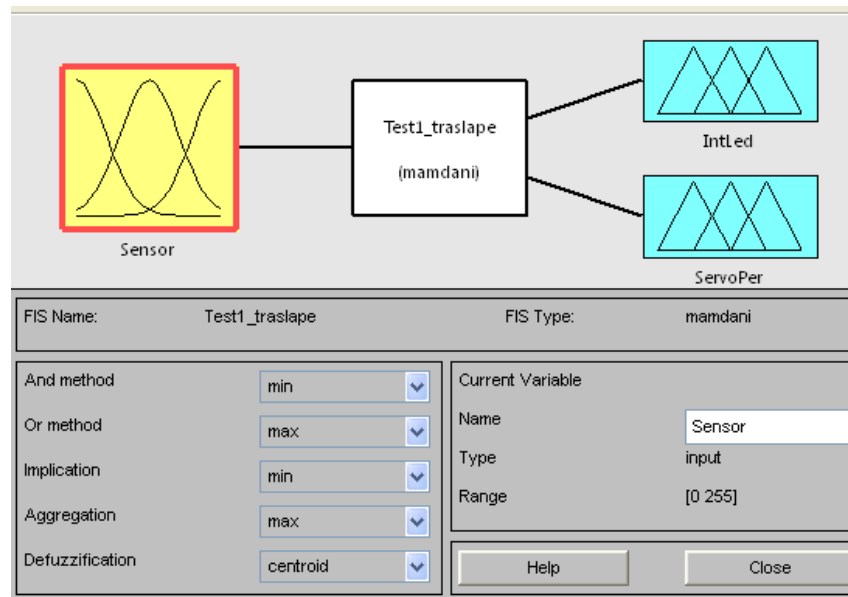
**Figura 3.9** LEDs como elementos final de control para alcanzar el nivel de luz adecuado.

Fuente: Propia

## 1.25 CONTROL DIRECTO O LAZO ABIERTO

Se planteó un diseño de un controlador difuso directo, en donde la entrada es del tipo analógica (sensor de luz) y salidas digitales (diodos LED). La conversión A/D y D/A se la hace a través del microcontrolador.

Para implementar los controladores, se utiliza el toolbox de lógica difusa (*Fuzzy logic toolbox*) de MATLAB® 7.8 [5]. Para ingresar a él se emplea el comando *fuzzy*, el cual permite trabajar en la ventana *FIS Editor*, donde se puede seleccionar el número de entradas y salidas del controlador, así como también se permite rotular dichas variables, tal como se aprecia en la Figura 3.11. Usando el *FIS Editor* se proceden a establecer las funciones de membresía o pertenencia siguiendo las recomendaciones del apartado 2.17.

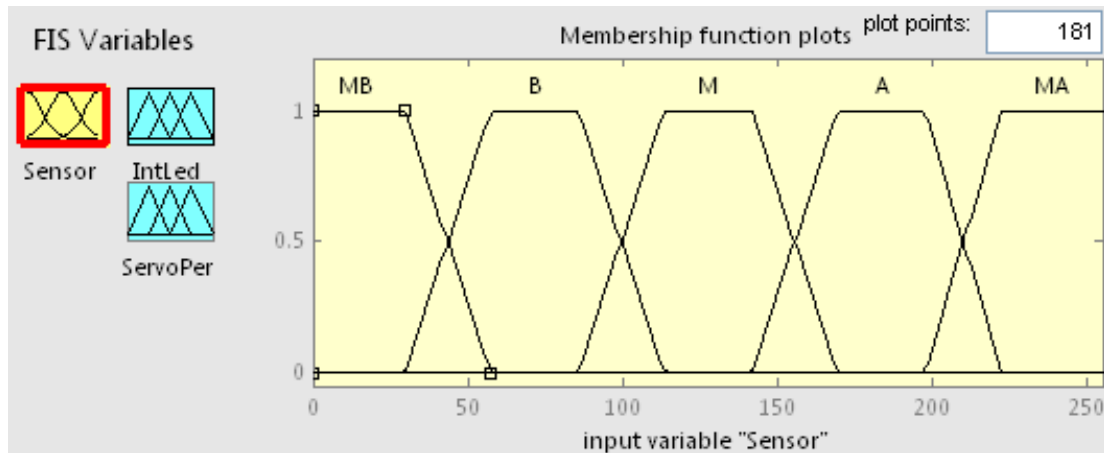


**Figura 3. 10** Sensor será la entrada del sensor de intensidad luminosa. Intled y ServoPer son las salidas para controlar la lámpara led y las persianas, respectivamente. Nótese las características seleccionadas para los conectores de inferencia borrosa y defuzzificación.

Fuente: *Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)*

Para las salidas se usaron funciones triangulares y trapezoidales en los extremos con un traslape del 50%, recordando que la salida de control es de naturaleza digital. Sin embargo también es factible manejar una señal analógica. Cuando se utiliza un sistema de control con salida discreta se puede tener una rápida velocidad de respuesta. En el caso de la salida para controlar la lámpara se usa un rango de 0 a 256 con 5 funciones de membresía. Para la salida que será usada para opacar el ambiente se usan tres funciones de pertenencia. Estas funciones pueden modificarse de acuerdo a la necesidad, pues el algoritmo de control se puede adaptar a estos cambios. Obviamente dichos cambios deberán ser hechos por un experto.

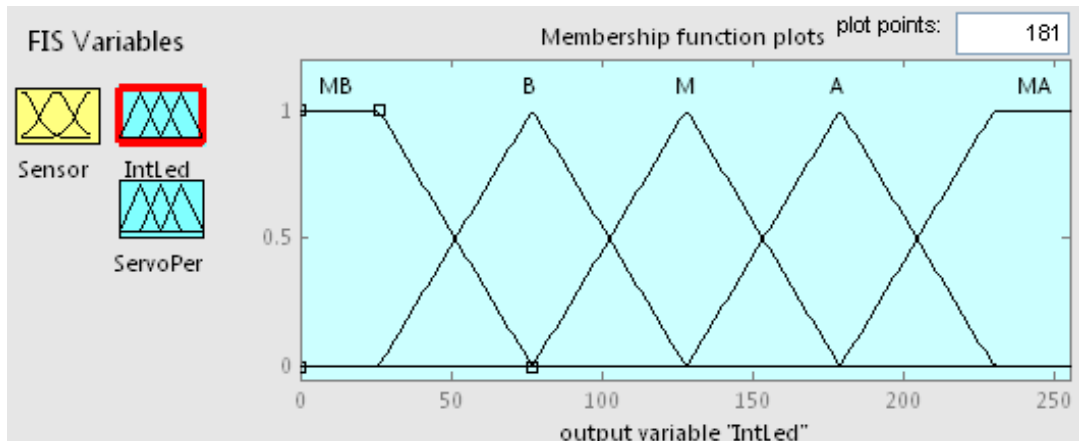




**Figura 3. 11** Funciones de pertenencia para la entrada *Sensor*. Fuente: *Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)*

**Tabla 3. 1** Funciones de pertenencia para la variable *Sensor*. Fuente: Propia

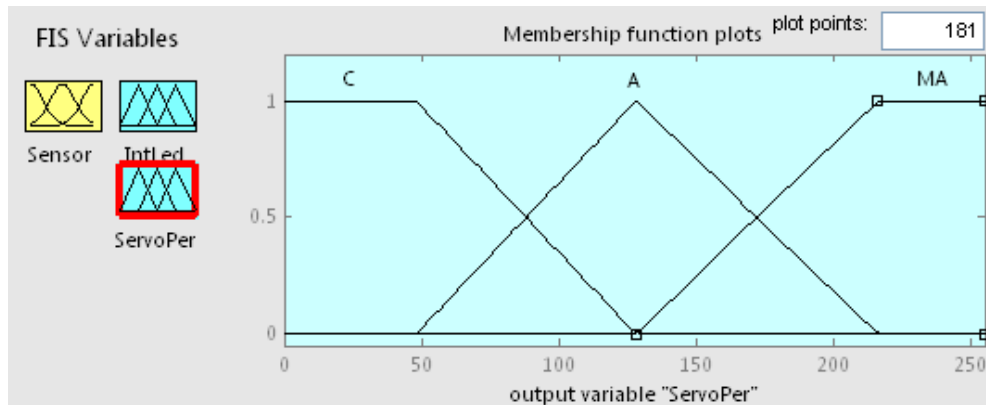
| Nombre | Descripción | Coordenadas función pertenencia |
|--------|-------------|---------------------------------|
| MB     | Muy Bajo    | [0 0 29.5 57.5]                 |
| B      | Bajo        | [29.5 57.5 85.5 113.5]          |
| M      | Medio       | [85.5 113.5 141.5 169.5]        |
| A      | Alto        | [141.5 169.5 197.5 222.5]       |
| MA     | Muy Alto    | [197.5 222.5 255 255]           |



**Figura 3. 12** Funciones de pertenencia para salida *IntLed* (control de la lámpara LED). Fuente: *Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)*

**Tabla 3. 2** Salida para controlar la lámpara LED. Fuente: Propia

| Nombre | Descripción | Coordenadas función pertenencia |
|--------|-------------|---------------------------------|
| MB     | Muy Bajo    | [0 0 26 77]                     |
| B      | Bajo        | [26 77 128]                     |
| M      | Medio       | [77 128 179]                    |
| A      | Alto        | [128 179 230]                   |
| MA     | Muy Alto    | [179 230 255 255]               |



**Figura 3. 13** Funciones de pertenencia para salida *Servo Per* (control de opacidad). Fuente: *Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)*

**Tabla 3. 3** Salida para controlar la opacidad del local. Fuente: Propia

| Nombre | Descripción | Coordenadas función pertenencia |
|--------|-------------|---------------------------------|
| C      | Cerrado     | [0 0 48 128]                    |
| A      | Abierto     | [48 128 216]                    |
| MA     | Muy abierto | [128 216 255 255]               |

### 1.25.1 Reglas difusas

Para relacionar las funciones de membresía, una vez que tienen nombres y formas adecuados, se procede a escribir las reglas difusas a través del *Rule Editor*.

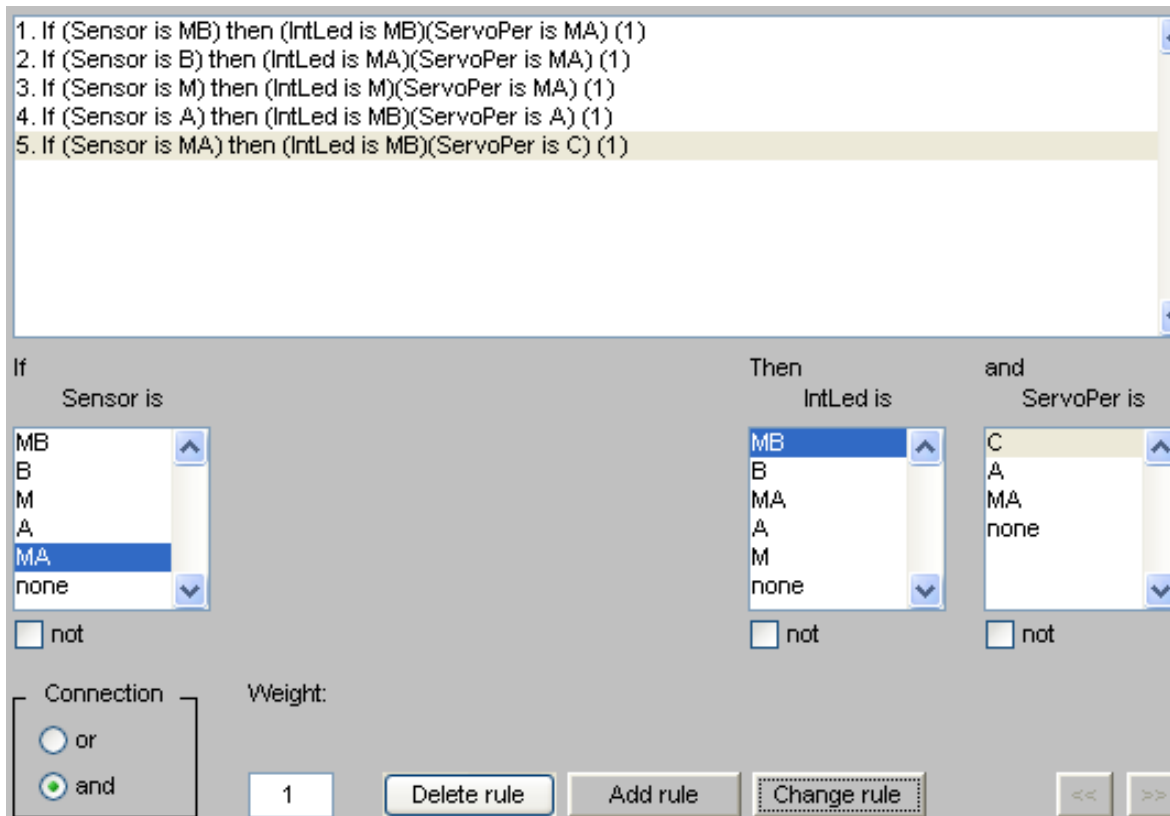


Figura 3. 14 Rule Editor. Fuente: Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)

Tabla 3. 4 Tabla de inferencia difusa. Fuente: Propia

|        |    | Control iluminación<br>(IntLed) | Control opacidad<br>(ServoPer) |
|--------|----|---------------------------------|--------------------------------|
| Sensor | MB | MB                              | MA                             |
|        | B  | MA                              | MA                             |
|        | M  | M                               | MA                             |
|        | A  | MB                              | A                              |
|        | MA | MB                              | C                              |

### 1.25.2 Mecanismo de inferencia

Se emplea el mecanismo de inferencia por factores de confianza, donde dependiendo de los grados de pertenencia de las variables de entrada se obtiene un factor de confianza por cada regla para la variable de salida. Se empleó el *and* lógico como el mínimo entre estos factores, para luego combinar estos resultados mediante el *or* lógico implementado como el máximo. Todas estas características pueden fijarse en la ventana del *FIS Editor*.

### 1.25.3 Método de defusificación

Se emplea el método de Mamdani, obteniendo la salida mediante el método del centroide.

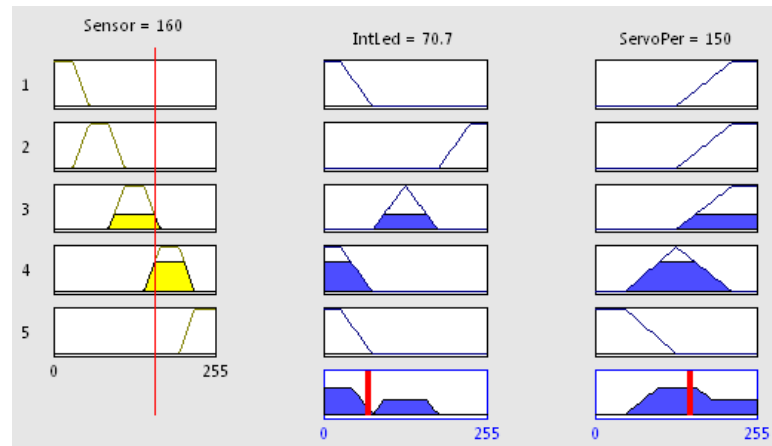
Una herramienta muy interesante que posee el toolbox empleado es *Rule Viewer*, la cual permite visualizar el estado de todas las reglas de control ante una determinada combinación de las variables de entrada, permitiendo además apreciar el comportamiento de la salida del controlador difuso y la salida defusificada para dichas entradas (representada por una línea vertical de color rojo). Esta ventana es la que se aprecia en la Figura 3.15.

## 1.26 DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO EN LAZO CERRADO

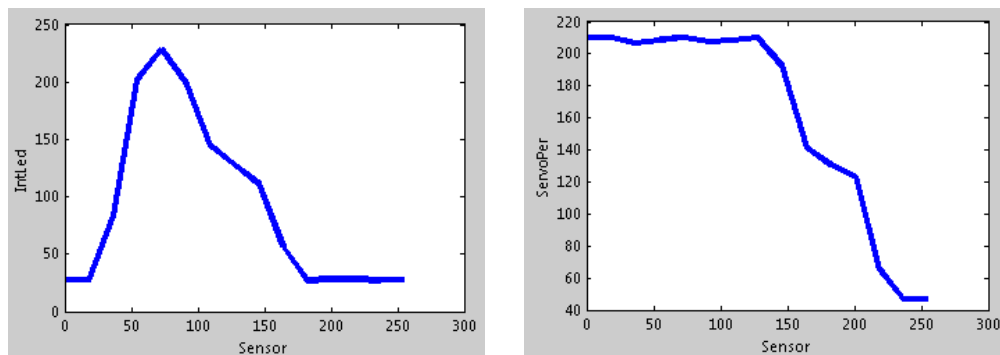
Considerando la descripción matemática de la planta realizada en el Anexo 2 donde se obtuvo el modelo de la misma, se procede a diseñar un sistema en base a lógica difusa mediante el cual se pueda controlar de buena forma la cantidad de luz suministrada al local. El diseño del controlador (ver Figura 3.16) se resume en los siguientes pasos:

### *Paso 1: Definición del problema*

El controlador que se va a diseñar tiene por objetivo minimizar la señal de error y el sobrepaso del sistema. La señal de mando es  $x^* t$  y de la salida del sistema  $x t$ .



(a)



(b)

(c)

(a) **Figura 3. 15 Rule Viewer**, (a) vista estándar, (b) y (c) gráficas de la variable de entrada vs las salidas. Fuente: *Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)*

### Paso 2: Definición de las entradas al controlador difuso

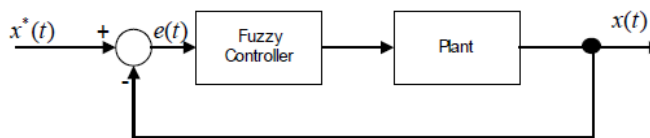
Considerando dos entradas para el controlador difuso:

1. Porcentaje del error relativo:

$$e_t = \frac{x^* t - x t}{x_{ss}} \times 100$$

2. Sobrepasso (*Overshoot*)

$$OS\% = \frac{x t - x_{ss}}{x_{ss}} \times 100$$



**Figura 3. 16** Diagrama de control difuso con retroalimentación.

### *Paso 3: Definición de las reglas*

Dado un número entre 0 y 1 que representa el valor de la función de membresía para la señal de error y otro número entre 0 y 1 que representa el valor de la función para el sobrepaso, la fuerza externa podría ser escrita, por ejemplo, por las siguientes reglas:

1. *Si el error es pequeño o el sobrepaso es bajo, entonces la luz es débil.*
2. *Si el error es mediano y el sobrepaso es promedio, entonces la luz es normal.*
3. *Si el error es grande o el sobrepaso es alto, entonces la luz es fuerte.*

### *Paso 4: Poner el sistema de inferencia borrosa (FIS) bajo Matlab*

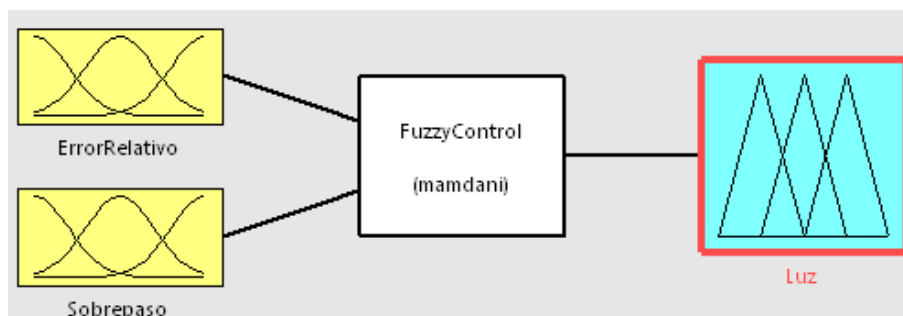
Se puede definir el significado de las palabras dándoles valores al error, al sobrepaso y la luz como se ilustra en la tabla 3.5.

Ahora se deben definir las funciones de pertenencia para cada entrada del controlador. Usando un *Fuzzy Inference System* en Matlab, colocando dos entradas y una salida y luego exportándolo a un archivo para su posterior uso en un archivo *.m* o en *Simulink*. Esta operación se muestra en la figura 3.18.

**Tabla 3. 5** Especificaciones para el sistema de inferencia borrosa.

Fuente: Propia

| <b>Error</b>     |              |            |
|------------------|--------------|------------|
| Pequeño (P)      | Mediano (M)  | Grande (G) |
| < 5%             | 2.5% - 10%   | > 8%       |
| <b>Sobrepaso</b> |              |            |
| Bajo (B)         | Promedio (P) | Alto (A)   |
| < 10%            | 5% - 20%     | >15%       |
| <b>Luz</b>       |              |            |
| Débil (D)        | Normal (N)   | Fuerte (F) |
| < 85             | 85 - 170     | > 170      |

**Figura 3. 17** Diagrama de bloques del controlador difuso. Fuente: *Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)*

Seguidamente se definen las funciones de membresía asociados con cada variable. Para hacer esto, se debe abrir el *Membership Function Editor* mediante un doble click sobre el ícono para las variables de entrada o salida. La siguiente tabla muestra los parámetros considerados para las funciones de membresía de cada variable:



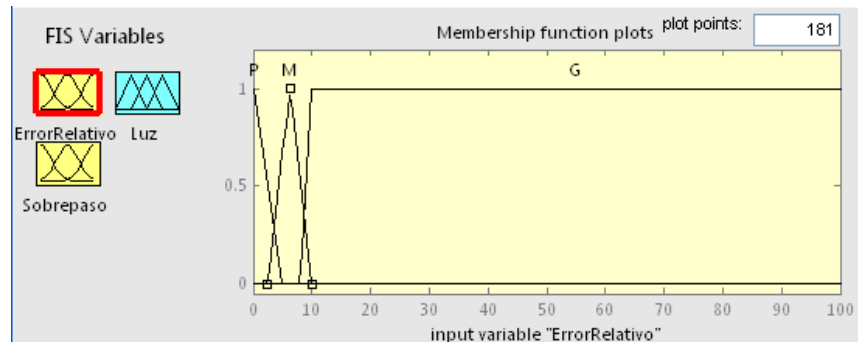
**Tabla 3. 6** Funciones de membresía para el controlador difuso con retroalimentación. Fuente: Propia

| <b>Entrada 1 - Error</b>     |        |                 |
|------------------------------|--------|-----------------|
| Pequeño (P)                  | trimf  | [-5 0 5]        |
| Medio (M)                    | trimf  | [2.5 6.25 10]   |
| Grande (G)                   | trapmf | [8 10 100 100]  |
| <b>Entrada 2 - Sobrepaso</b> |        |                 |
| Bajo (B)                     | trimf  | [0 5 10]        |
| Promedio (P)                 | trimf  | [5 12.5 20]     |
| Alto (A)                     | trapmf | [15 20 100 100] |
| <b>Salida - Luz</b>          |        |                 |
| Débil (D)                    | trimf  | [0 43 85]       |
| Normal (N)                   | trimf  | [85 128 170]    |
| Fuerte (F)                   | trapmf | [170 213 255]   |

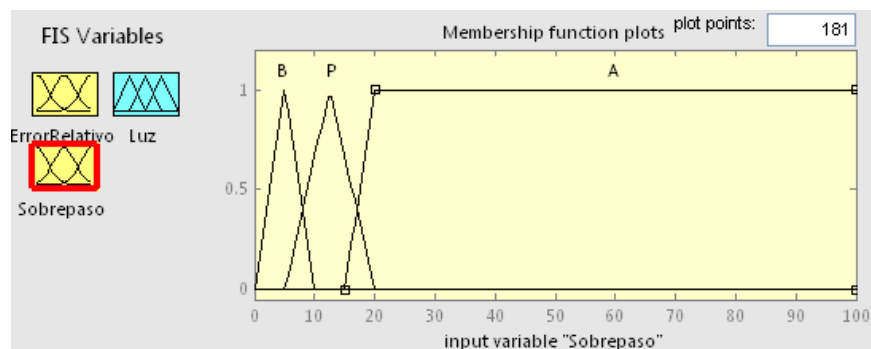
Aquí se han considerado funciones tipo triangular (trimf) y trapezoidales (trapmf) para las funciones de pertenencia.

Una vez que las variables han sido nombradas, y las funciones de membresía tienen nombres y formas adecuados, se procede a escribir las reglas difusas a través del *Rule Editor* definiendo las proposiciones de acuerdo al comportamiento que se espera del sistema controlado.

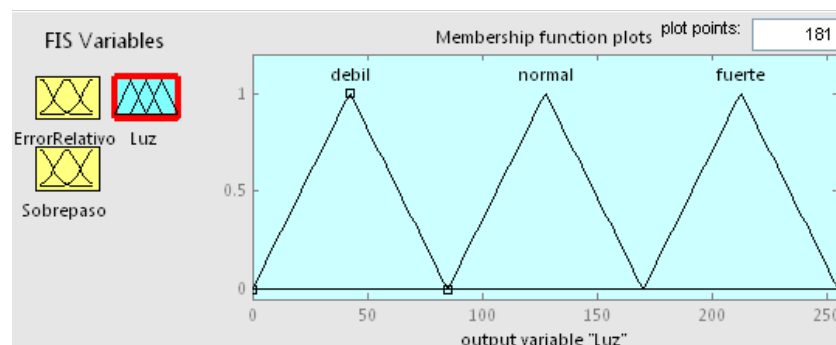
Se considera el mismo peso (o ganancia) para todas las reglas. Para este punto el controlador de inferencia difuso ha sido completamente definido, en el cual las variables, las funciones de membresía y las reglas necesarias para calcular la luz artificial están en su lugar. Entonces se puede mirar el comportamiento del sistema de inferencia difusa usando el *Rule Viewer*.



(a)



(b)

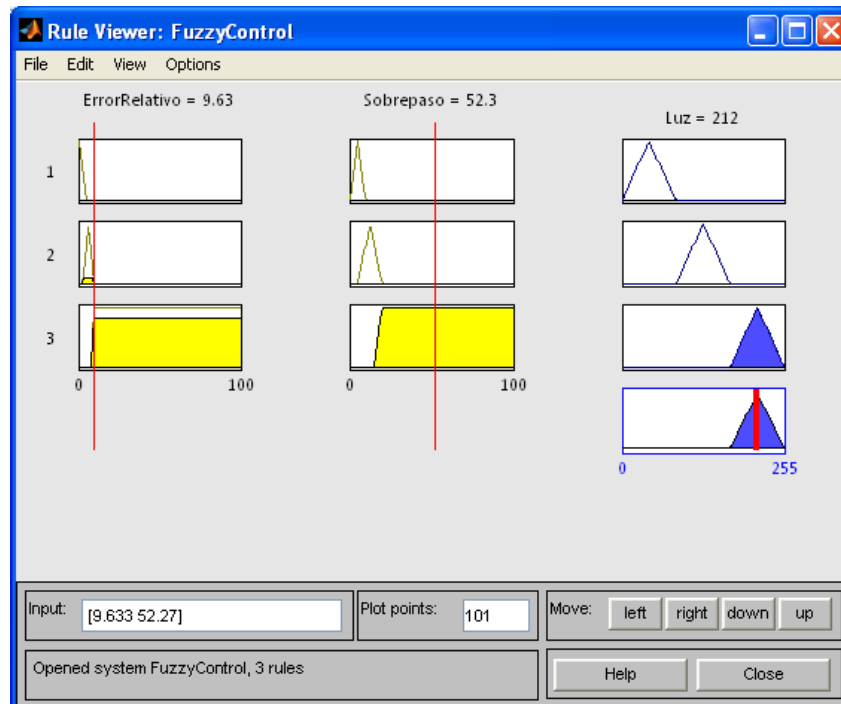


(c)

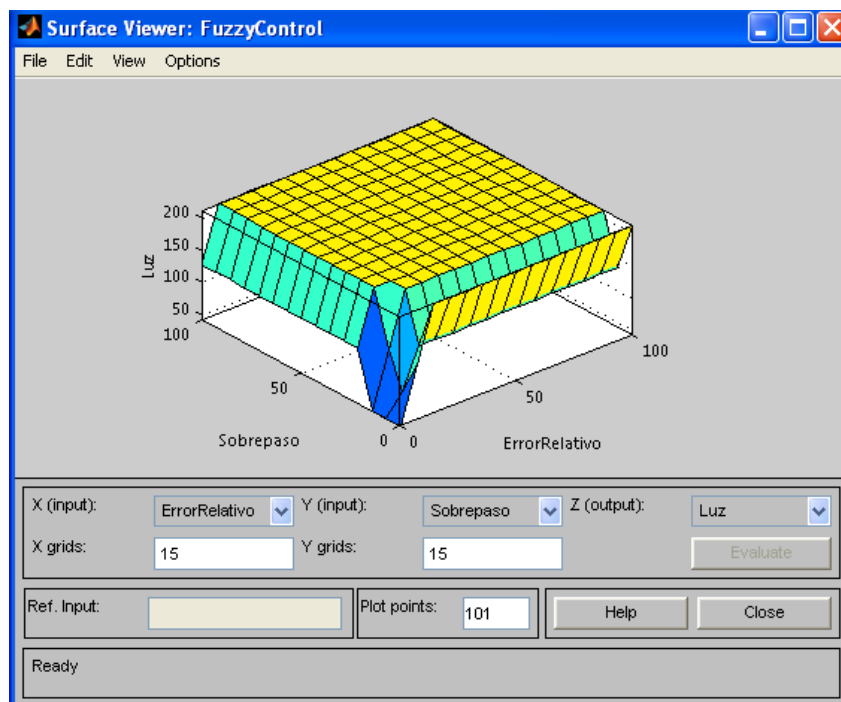
**Figura 3. 18** Funciones de pertenencia. Entradas: (a) Error, (b) Sobrepaso y Salida (c) Luz.

Fuente: *Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)*

Una vez creado el controlador, es posible observar la superficie que representa la salida del controlador difuso como función de las 2 señales de entrada, lo que se aprecia en la Figura 3.21.



**Figura 3. 19** Rule viewer. Fuente: Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)



**Figura 3. 20** Superficie de control difusa. Fuente: Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB 7.8.0 (R2009.a)

*Paso 5: Poner el sistema de inferencia difusa (FIS) bajo Matlab.*

## CAPÍTULO 4

### IMPLEMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 1.27 IMPLEMENTACIÓN

Una vez que se ha diseñado un par de controles difusos y se han podido analizar sus características se procede a la implementación de un prototipo que ante todo servirá para realizar demostraciones en laboratorio de cómo se comporta un control borroso o difuso. Al respecto se hacen ciertas consideraciones:

- Dado que la salida del controlador difuso es proporcional a la derivada de la actuación real que debe aplicarse al sistema, es preciso que la salida (defusificada) sea escalada para posteriormente escalar este rango al intervalo real en el cual opera la planta, que en este caso es entre 0 y 255 (señal en bits que posteriormente será transformada a señal de voltaje 0-5 voltios DC por el microcontrolador).
- El controlador tiene una entrada que puede ser considerada para la fuzificación la cual es la intensidad luminosa. La otra variable de entrada corresponde al sensor que detecta el día o la noche, ésta se considera como discreta, es decir que no tendría sentido fuzificarla.
- Las salidas analógicas de respuesta son: la regulación de voltaje sobre las lámparas (señal analógica) o el control de encendido de un juego de luces led (señal digital), y una señal para controlar la opacidad (por ejemplo el movimiento del servomotor sobre las persianas o un vidrio inteligente).
- El prototipo también posee sistema para detección de movimiento, el cual es del tipo discreto y se emplea en caso de que las personas hayan abandonado la habitación sobre la cual se efectúa el control. En el caso del prototipo se ha instalado un mecanismo que simula la presencia de personas.

El detalle del programa puede verse en el Anexo 3, cabe destacar que el algoritmo del programa se facilita de gran manera gracias al uso de las funciones

*readfis* y *evalfis*, las cuales permiten evaluar de manera directa los valores de una o varias entradas en un sistema de inferencia difuso, por ejemplo:

```
fis=readfis('Test1');  
out=evalfis(SL,fis);
```

**readfis** llama al sistema de inferencia difuso llamado *Test1*, por su parte **evalfis** evalúa el valor almacenado en SL correspondiente a una entrada o un vector de entradas y luego de ser evaluadas (similar al *Rule editor*) el valor se guarda en *out*, este valor puede ser usado como señal o un vector de señales de control.

El siguiente paso es programar el microcontrolador para provocar la interfaz entre la computadora, donde se halla el algoritmo del controlador difuso, y los sensores y actuadores. Para el efecto se uso lenguaje BASIC a través del programa *Microcode Studio* y como compilador el software *IcProg*. El programa completo puede apreciarse en el Anexo 4.

La conexión de los diferentes elementos del sistema prototipo se ilustra en la Figura 4.1. El funcionamiento de la mayoría de las partes fue descrito en su mayoría en el capítulo 3. Uno de los puntos a destacar es la pantalla LED que se usa para ir visualizando y comparando los datos leídos por los sensores y los datos recibidos desde el computador en caso de que se pueda ocasional alguna anomalía. También indica el estado de comunicación entre el PC (Matlab) y los actuadores o sensores. Se utilizó un sistema de comunicación serial RS232 básicamente porque es simple de programar y se acopla perfectamente al lenguaje de programación del Matlab y el Basic del Microcode Studio.

Las configuraciones para establecer la comunicación entre el controlador desarrollado en Matlab y la planta prototipo de iluminación se detallan en los Anexos 3 y 4.

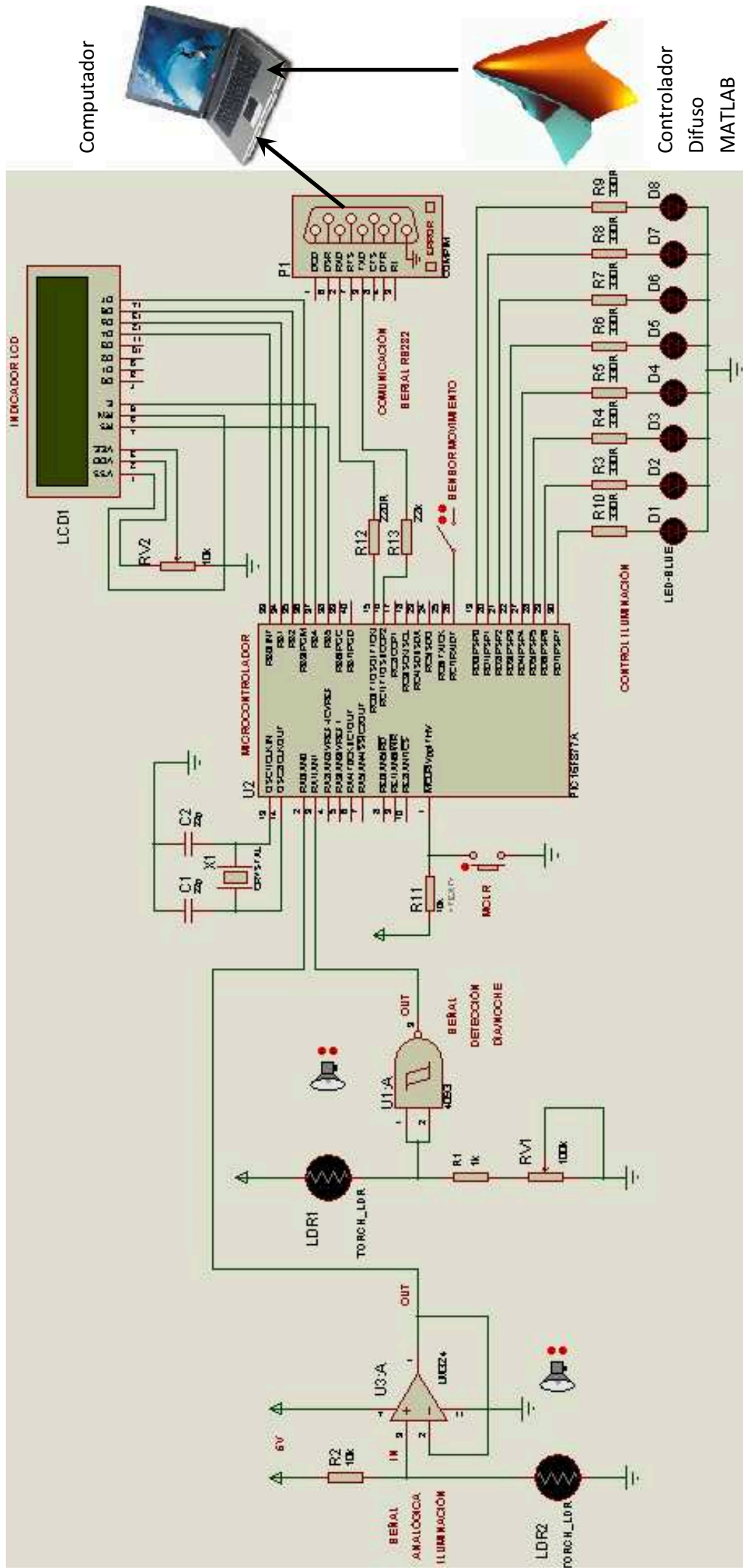
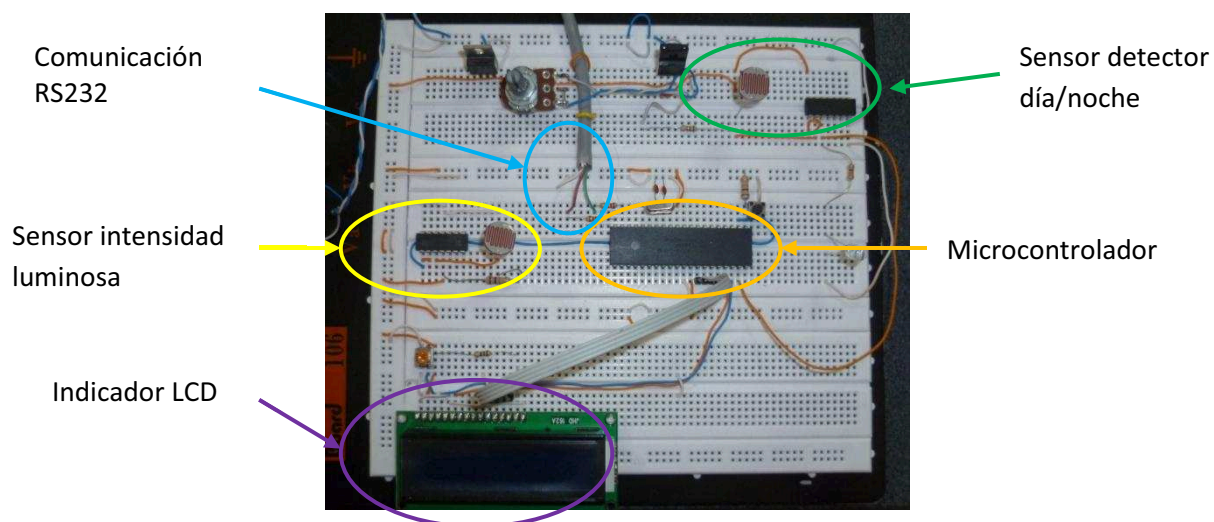


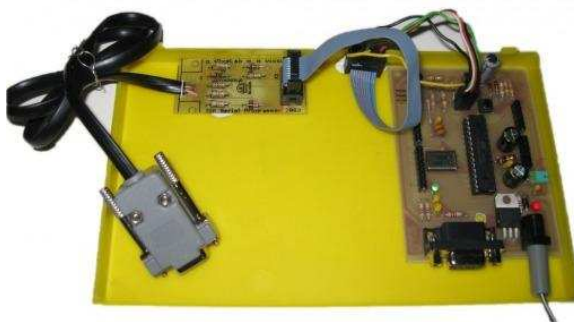
Figura 4. 1 Esquema de conexión de los elementos para el prototipo de control. Fuente: Propia

## 1.28 PRUEBAS DEL SISTEMA

Para una evaluación preliminar del prototipo de control se empezó con el circuito de la Figura 4.2, donde se hallan conectados los dispositivos analizados con anterioridad. Luego de completar las pruebas y estudiar posibilidades de mejora o diseño se procedió a realizar un PCB con todos los componentes el cual podrá ser usado en laboratorio.



**Figura 4. 2** Circuito de prueba para el prototipo de control difuso



**Figura 4. 3** Prototipo terminado

Para realizar las pruebas con el controlador difuso se sugiere seguir el siguiente procedimiento:

1. Abrir el programa Matlab y abrir el archivo *CFuzzyD* en el caso del control directo o *CFuzzy* para el control con retroalimentación.

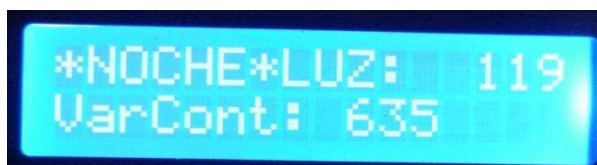
2. Conectar el controlador prototipo a la PC mediante el cable serial RS232. En caso de que la computadora no posea este puerto como sucede en la mayoría de laptops se deberá usar el adaptador RS232/USB, instalando previamente los drivers del dispositivo.
3. Encender el prototipo, enseguida la pantalla LCD mostrará el mensaje EPN-AUOMATIZACION.



4. En el Matlab pulsar F5 o RUN para ejecutar el programa, Si esto no se lleva a cabo simplemente no se establecerá la comunicación con el prototipo. Por el contrario un mensaje indicando que la comunicación se halla establecida se muestra.



5. Dependiendo si es de día o de noche el controlador lo hará conocer, y también indicará el valor leído por el sensor de luz y la señal del controlador, ambos en valores de 0 a 255.

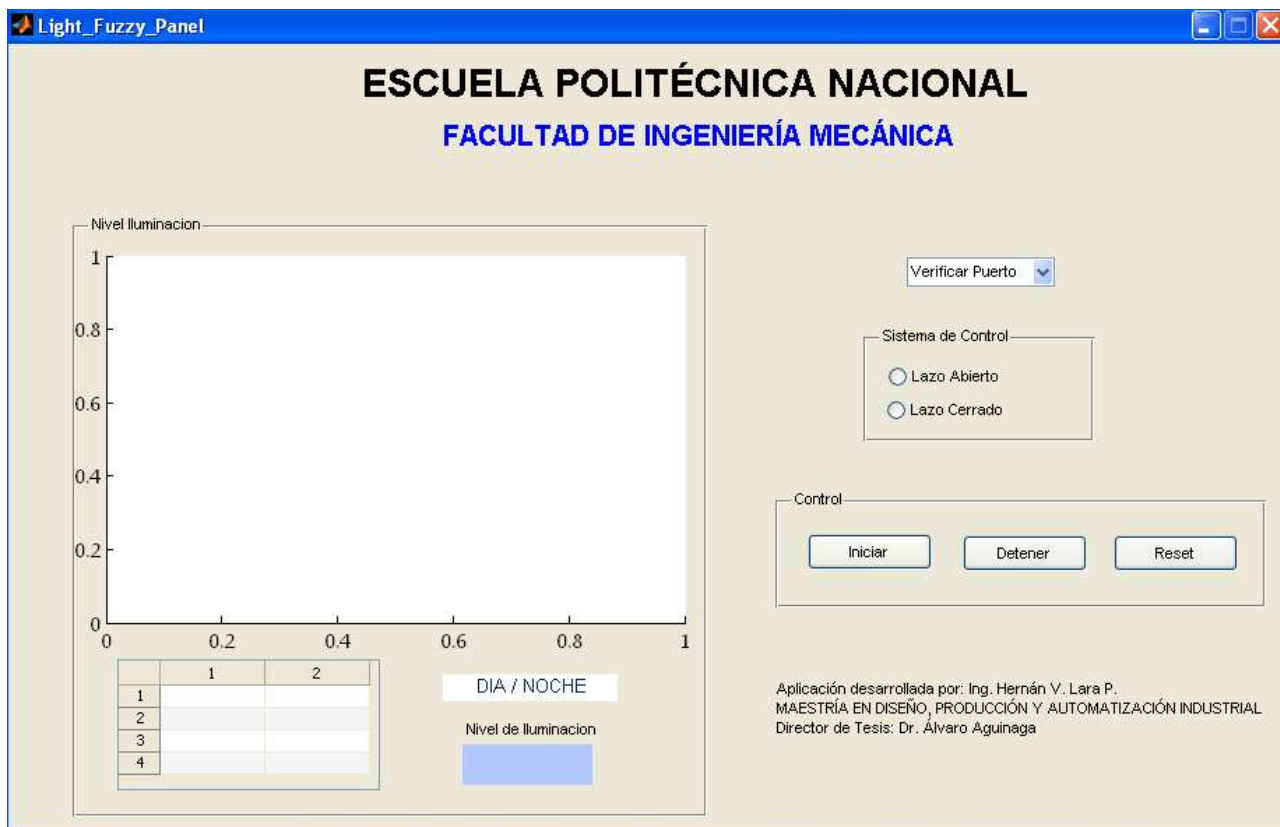


6. Mientras el algoritmo de control se efectúa es posible ir generando perturbaciones para analizar la respuesta del sistema con el control difuso.
7. Finalmente se puede detener el programa primero en Matlab y luego desconectando el prototipo.



El prototipo puede ser usado para realizar variaciones de las funciones de membresía en Matlab, agregarlas al programa principal y estudiar el comportamiento dinámico del sistema.

También se ha elaborado una interfaz gráfica que permite un manejo más simplificado del controlador difuso, la ventana principal se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4. 4.** Programa Light\_Fuzzy\_Panel. Fuente: Propia.

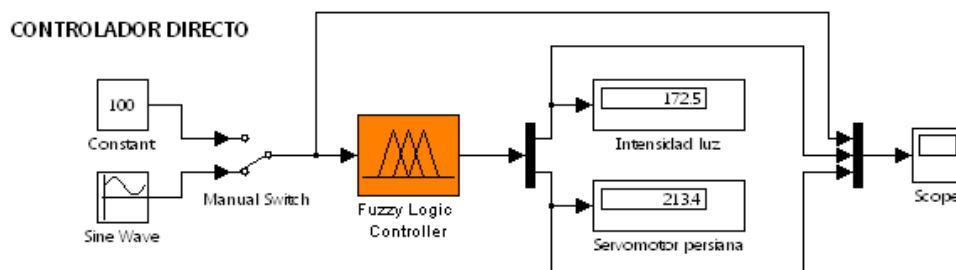
En esta interfaz gráfica de Matlab se puede establecer una rápida comunicación entre el controlador difuso y el prototipo. Básicamente se debe comprobar el número de puerto usado, se selecciona el tipo de control, lazo abierto o cerrado. Con el botón Iniciar empieza el funcionamiento del sistema de control difuso. Se puede detener en cualquier instante. La interfaz también permite graficar los datos del sensor de luz en tiempo real y grabarlos. También permite mostrar el valor numérico y establece si es Día o Noche.

Sin embargo para modificar el sistema de inferencia difuso se requiere ingresar al *Fuzzy Logic Toolbox* y cargar nuevamente al programa principal. (Anexo 3)

## 1.29 ANÁLISIS DE RESULTADOS

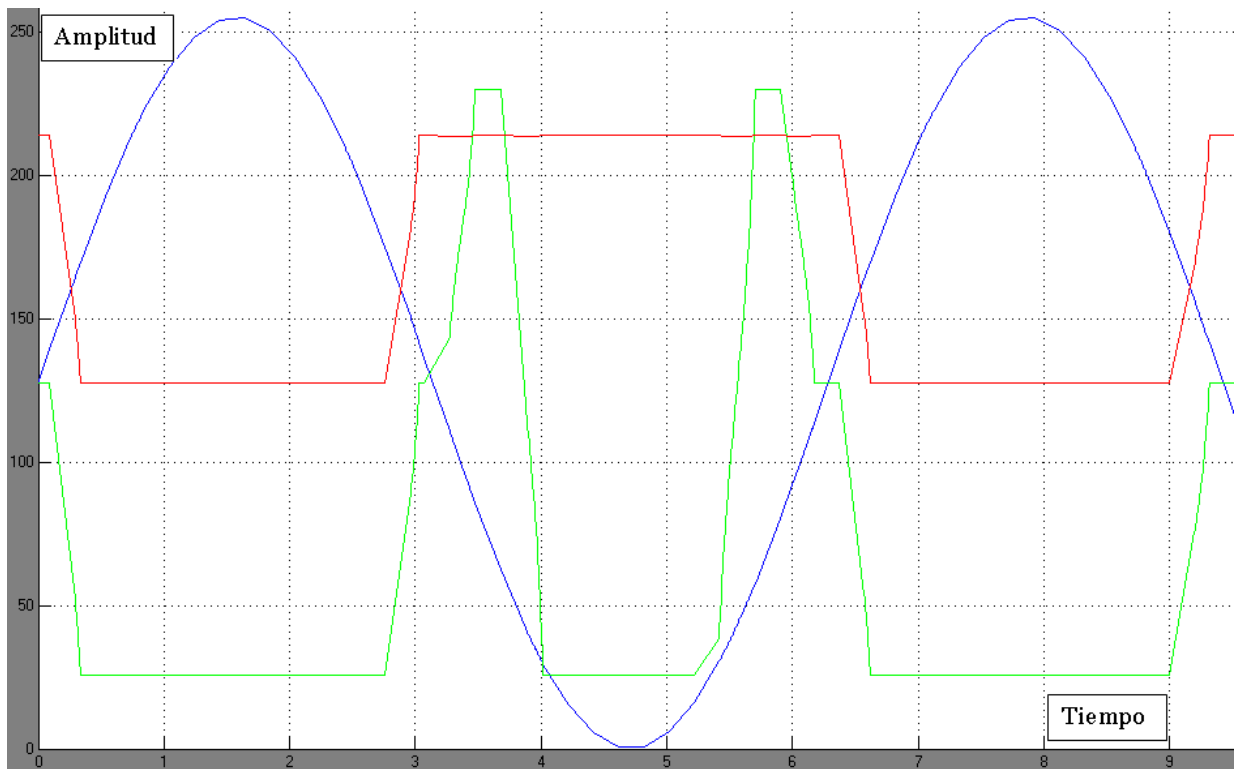
### 1.29.1 Comportamiento del sistema en lazo abierto

En la figura 4.5 se muestra un modelo en *Simulink* y su comportamiento dinámico para una entrada tipo senoidal.



**Figura 4. 5** Modelo de control difuso directo diagramado en Simulink para el estudio del comportamiento dinámico.

La respuesta dinámica del sistema para una entrada tipo senoidal se puede ver en la Figura 4.6, la velocidad de respuesta es muy rápida y se puede decir que para muchas aplicaciones el control difuso en lazo abierto o directo puede ser usado. En el caso de la planta de iluminación el sistema de control presenta una respuesta rápida (alrededor de 2 segundos) a perturbaciones. En este caso no hace falta conocer el modelo matemático de la planta, pues bastará con diseñar adecuadamente el sistema de inferencia difusa para un correcto desempeño del controlador. Entonces es posible aplicar este tipo de control a sistemas de control basados en teorías como las de control no lineal y multivariable.



**Figura 4. 6** Respuesta dinámica de un controlador difuso directo. (Azul: señal de entrada, verde: señal control de iluminación, rojo: señal control de opacidad). Fuente: *Matlab Simulink*

### 1.29.2 Comportamiento del sistema en lazo cerrado y comparación con un control

#### PID

Para estudiar el comportamiento del sistema y poder compararlo con un control tipo PID se crea un modelo en *Simulink* donde se aplica el FIS desarrollado.

Para llevar cabo este análisis fue necesario obtener el modelo matemático de la planta. Para lo cual se usó la teoría de identificación de sistemas (ver anexo 2). El modelo es aproximado y no se obtuvo un coeficiente de validación alto lo que significa que el modelo matemático obtenido no resultó ser satisfactorio, sin embargo se consideró adecuado representarlo para poder hacer el análisis de comparación entre el sistema de control difuso en lazo cerrado con el PID.

El diagrama de simulación se indica en la Figura 4.7. Por otra parte el comportamiento dinámico del sistema modelado se puede apreciar en la Figura 4.8.

CONTROLADOR DIFUSO ERROR VS PID

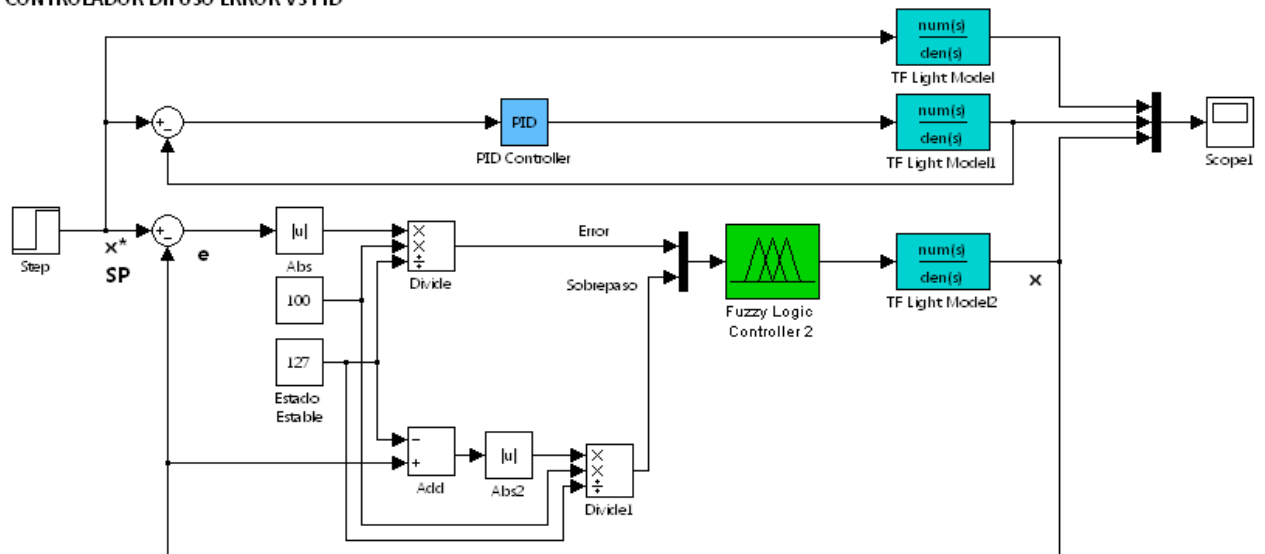


Figura 4. 7 Diagrama control PID vs Control Difuso. Fuente: *Matlab Simulink*

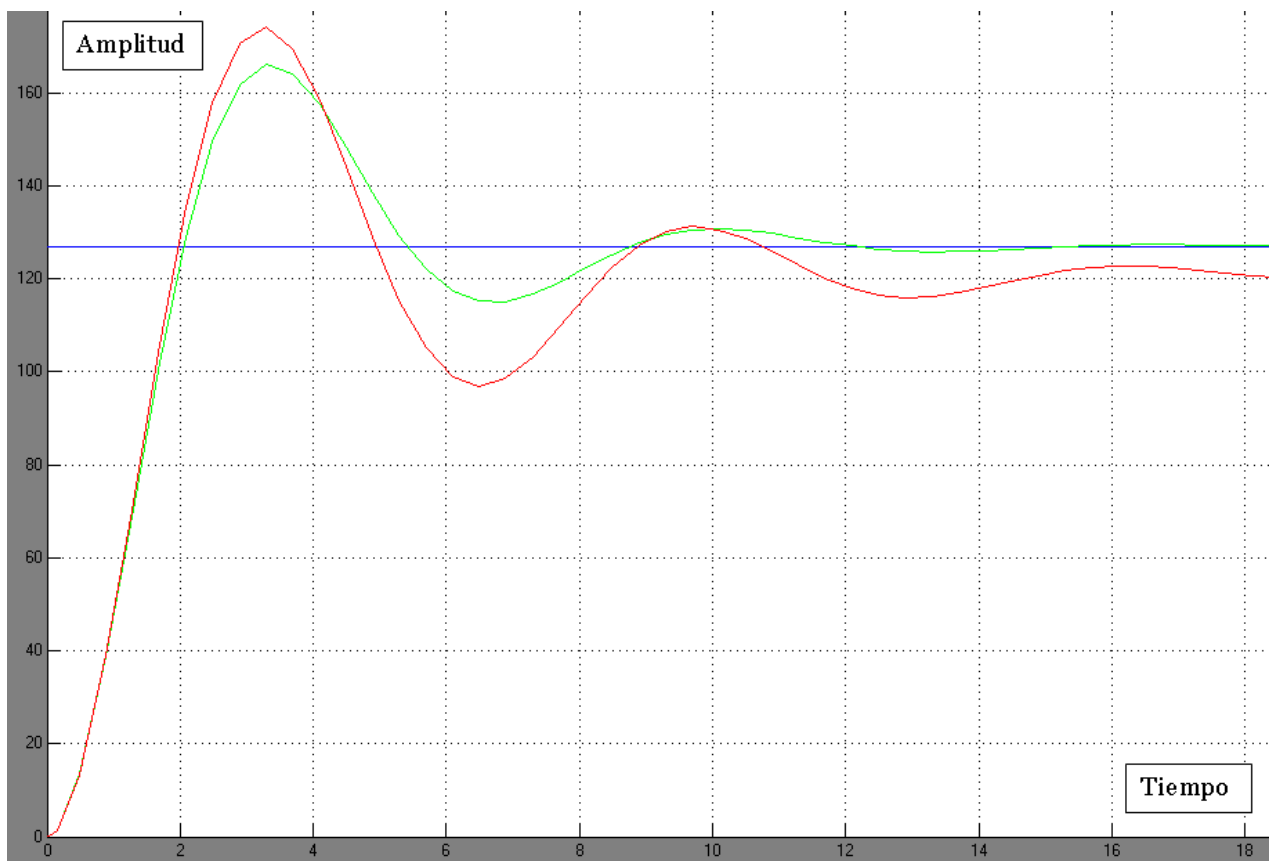


Figura 4. 8 Respuesta dinámica control PI (verde) versus Controlador Difuso (rojo). En azul se representa la señal de excitación. Fuente: *Matlab Simulink*

Para obtener una adecuada regulación por parte del controlador clásico se ha eliminado la parte derivativa, quedando el controlador como un tipo PI (proporcional-integral) a través de la constante integral se ha eliminado el error en estado estable. El sistema controlado por lógica difusa ha permitido controlar el sobrepaso, sin embargo el error en estado estable tiende a eliminarse en un período de tiempo muy grande de casi 30 segundos.

Como se puede apreciar para un sistema de iluminación resultó más adecuado realizar un controlador difuso en lazo abierto, cuyo comportamiento real así lo demuestra. El diseño de sistemas de control difusos en lazo cerrado según [10] se los puede aplicar a sistemas que ya tienen implementados sistemas PID y los cuales se requieren suplantar por controladores difusos para mejorar su desempeño.

El desempeño de los controladores difusos en lazo abierto resultó ser más eficiente respecto de la rapidez de respuesta: tiempo de establecimiento de un par de segundos, precisión: error en estado estable prácticamente nulo y estabilidad buena con rebase casi nulo.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 1.30 CONCLUSIONES

- En esta tesis, el diseño y la simulación de un controlador difuso han sido analizadas para aportar al ahorro energético en instalaciones educativas, asimismo se ha construido un prototipo para analizar el comportamiento dinámico del sistema, por lo cual se puede concluir que se han cumplido los objetivos e hipótesis de esta Tesis.
- La aplicación de la lógica difusa en el diseño de los sistemas de control, se presenta como un método de gran capacidad y eficacia. Aprovechando el conocimiento del experto que conoce el comportamiento del sistema a controlar, permite realizar toma de decisiones similares a como la haría un humano pero con aproximaciones numéricas.
- Un importante sistema de adquisición de datos y comunicación fue desarrollado y aprovechado para el estudio del comportamiento del control difuso. El programa de control puede ser usado para ajustar el nivel de luz de la lámpara, mediante un control digital que permitirá el ahorro de energía. El dispositivo es confiable y conveniente para el mantenimiento.
- Los resultados experimentales han mostrado respuesta satisfactoria del sistema en contra de los cambios súbitos de la iluminación ambiental. Este dispositivo inteligente podría usarse para controlar otros sistemas de iluminación tales como luces de calles, de parques, luces de automóviles, regulándolos automáticamente de acuerdo a la luz ambiente, los cuales trabajarían de forma confiable y obteniendo buenos resultados en cuanto al ahorro energético.
- Con respecto al control difuso de luz implementado, posee las ventajas de no necesitar un modelo matemático preciso del sistema a controlar, tiene alto rechazo al ruido y permite contemplar situaciones excepcionales del estado del proceso, gracias a su forma de representar el conocimiento.

- Como desventaja se puede decir, que el diseño debe realizarse generalmente con el método de prueba y error hasta encontrar el mejor valor para las funciones de pertenencia. Para conseguir los resultados presentados en este proyecto fue necesario hacer una serie de pruebas variando muchos parámetros dentro del *Fuzzy Inference System* del Matlab.
- Un sistema de iluminación posee varios dispositivos de naturaleza no lineal que imposibilitaron obtener un modelo matemático satisfactorio a través de la identificación de sistemas. Sin embargo se mantuvo el desarrollo del proceso y los resultados obtenidos para ayudar a futuras aplicaciones en la obtención del modelo del proceso físico de manera rápida.
- Aún es el caso donde el PID tradicional sigue siendo superior a los controladores difusos, esto dependiendo de la aplicación pues existen procesos en donde los modelos matemáticos de plantas y controladores se han desarrollado por muchos años, tales como procesos de temperatura, presión, caudal y nivel. Sin embargo, existen estudios para ir masificando las aplicaciones de la lógica difusa en aplicaciones en varias áreas de la ingeniería.

### 1.31 RECOMENDACIONES

- Resultaría de gran utilidad comprobar un sistema de control difuso con varios tipos de funciones de membresía en este y otros prototipos de control que se podrían fabricar para el efecto pues se lograrían mejores resultados.
- Sería útil realizar un sistema de control difuso embebido, probablemente en un microcontrolador, para estudiar sus características dinámicas, pues en aplicaciones industriales se requieren sistemas portables de fácil montaje e instalación. Obviamente para el efecto habrá que desarrollar una teoría matemática de fácil programación y desempeño, pues los microcontroladores no poseen funciones para lógica difusa.
- Para sintonizar más fácilmente un controlador difuso se sugiere como una futura aplicación crear un programa para modificar en línea las ganancias de ajuste para un controlador difuso, a través de algún mecanismo de adaptación que permita acomodar la respuesta dinámica del lazo con respecto a un sistema de referencia dado.
- Para un estudio más profundo de ahorro energético en centros educativos y oficinas se recomienda extender el análisis sistemas que posean varios sistemas de control difuso y puedan ser controlados desde una unidad central.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] GANSLANDT R., *Handbook of Lighting Design*, ERCO, Berlin, 1996.
- [2] CLIVE W, *Good Lighting for Schools and Educational Establishments 2*, Fordergemeinschaft Gules Licht, 2003.
- [3] MARTIN DEL BRIO B., SANZ A., *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*, Alfaomega, 2007.
- [4] SIMPSON R., *Lighting Control-Technology and Applications*, Focal Press, 2003.
- [5] MathWorks, *Fuzzy Logic Toolbox*, 2005.
- [6] JAIN C., Martin N., *Fusion of Neural Networks, Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications*, CRC Press, 1998.
- [7] CEI – IEC, *International Standard Part 7: Programmable Controllers Fuzzy Logic Programming*, 2000.
- [8] JAVIDBAKTH S., *Design of a Controller to Light Level in a Commercial Office*, Ferdouse University, 1992.
- [9] ROSS T., *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, Jhon Willey, 2004.
- [10] JANTZEN J., *Design of Fuzzy Controllers*, Technical University of Denmark, Denmark, 1998.
- [11] JANTZEN J., *Tunning of Fuzzy PID Controllers*, Technical University of Denmark, Denmark, 1998.
- [12] IBRAHIM D., *Microcontroller Based Applied Digital Control*, John Wiley & Sons, Ltd, 2006

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### Datos de Intensidad de Luz (20 hasta el 24 de septiembre del 2010).

Los datos recogidos en esta fecha fueron realizadas en un aula modelo en intervalos de una a dos horas desde las 07H00 a.m. hasta las 18 H 00 los datos obtenidos fueron los siguientes.

| 20 Septiembre |   |        |        |
|---------------|---|--------|--------|
| HORA          | AREA DE DISTRIBUCIÓN Intensidad en Footcandelas |        |        |
|               | Área 1  | Área 2 | Área 3 |
| 07H15         | 9   | 10     | 14     |
| 08H30         | 9   | 10     | 14     |
| 09H30         | 10  | 10     | 14     |
| 11H00-11H30   | 10  | 10     | 16     |
| 13H00         | 10  | 11     | 20     |
| 14H00         | 10  | 11     | 20     |
| 15H00         | 10  | 11     | 18     |
| 16H00         | 10  | 11     | 16     |
| 17H00-18H00   | 9   | 10     | 15     |
|               |   |        |        |
| 21 Septiembre |   |        |        |
| HORA          | AREA DE DISTRIBUCION Intensidad en Footcandelas |        |        |
|               | Área 1  | Área 2 | Área 3 |
| 07H15         | 9   | 9      | 14     |
| 08H30         | 9   | 9      | 14     |
| 09H30         | 9   | 10     | 16     |
| 11H00-11H30   | 10  | 10     | 18     |

|                      |  |               |               |
|----------------------|--|---------------|---------------|
| 13H00                | 10   | 11            | 21            |
| 14H00                | 10   | 11            | 20            |
| 15H00                | 10   | 11            | 18            |
| 16H00                | 10   | 10            | 18            |
| 17H00-18H00          | 9  | 9             | 16            |
| <b>22 Septiembre</b> |  |               |               |
| <b>HORA</b>          | <b>AREA DE DISTRIBUCION Intensidad en Footcandelas</b> |               |               |
|                      | <b>Área 1</b>  | <b>Área 2</b> | <b>Área 3</b> |
| 07H15                | 8  | 8             | 14            |
| 08H30                | 9  | 9             | 16            |
| 09H30                | 9  | 10            | 17            |
| 11H00-11H30          | 10   | 10            | 18            |
| 13H00                | 10   | 10            | 20            |
| 14H00                | 10   | 10            | 20            |
| 15H00                | 10   | 10            | 20            |
| 16H00                | 9  | 10            | 17            |
| 17H00-18H00          | 8  | 9             | 14            |
|                      |  |               |               |
| <b>23 Septiembre</b> |  |               |               |
| <b>HORA</b>          | <b>AREA DE DISTRIBUCION Intensidad en Footcandelas</b> |               |               |
|                      | <b>Área 1</b>  | <b>Área 2</b> | <b>Área 3</b> |
| 07H15                | 8  | 8             | 14            |
| 08H30                | 9  | 9             | 15            |
| 09H30                | 9  | 10            | 17            |
| 11H00-11H30          | 10   | 10            | 20            |

|               |   |        |        |
|---------------|---|--------|--------|
| 13H00         | 10  | 10     | 21     |
| 14H00         | 10  | 10     | 21     |
| 15H00         | 10  | 10     | 22     |
| 16H00         | 9   | 10     | 17     |
| 17H00-18H00   | 9   | 10     | 16     |
| 24 Septiembre |   |        |        |
| HORA          | ÁREA DE DISTRIBUCION Intensidad en Footcandelas |        |        |
|               | Área 1  | Área 2 | Área 3 |
| 07H15         | 9   | 8      | 16     |
| 08H30         | 9   | 9      | 18     |
| 09H30         | 9   | 10     | 20     |
| 11H00-11H30   | 10  | 10     | 22     |
| 13H00         | 10  | 10     | 22     |
| 14H00         | 10  | 10     | 22     |
| 15H00         | 10  | 10     | 21     |
| 16H00         | 10  | 10     | 18     |
| 17H00-18H00   | 9   | 10     | 17     |

Como se puede observar en los cuadros de intensidades de luz los valores obtenidos se encuentran en footcandelas estos deben ser transformados en lux para el diseño.

En los datos de intensidades de luz se puede observar que se encuentra separados por áreas en dichas áreas es donde se realizó la toma de datos. Básicamente se dividió el aula en tres partes una bien iluminada (área 3), parcialmente iluminada (área 2) y mal iluminada (área 1)

## REQUISITOS GENERALES DE ILUMINACION NATURAL

- La disposición de iluminación externa servirá de base para determinar el factor de luz natural que debe mantenerse en cualquier ambiente interior.
- Los niveles de iluminación necesarios para las diferentes tareas visuales se especifican en el Código de Práctica INEN para Iluminación de Interiores. Si no se logra la cantidad requerida de iluminación con luz natural, será indispensable usar luz artificial complementaria para alcanzar los niveles de iluminación requeridos.

### Factores de luz natural recomendados para interiores

| AMBIENTE                       | PORCENTAJE DEL FACTOR DE LUZ NATURAL |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| VIVIENDAS                      |                                      |
| <b>Salas</b>                   | <b>0,625</b>                         |
| <b>Cocinas</b>                 | <b>2,5</b>                           |
| <b>Dormitorios</b>             | <b>0,313</b>                         |
| <b>Estudios</b>                | <b>1,9</b>                           |
| <b>Circulaciones</b>           | <b>0,313</b>                         |
| ESCUELAS                       |                                      |
| <b>Salas de clases</b>         | <b>1,9</b>                           |
| <b>Salas de lectura</b>        | <b>2,0 a 2,5</b>                     |
| <b>Salas de estudio</b>        | <b>2,0 a 2,5</b>                     |
| <b>Laboratorios</b>            | <b>1,9 a 3,8</b>                     |
| OFICINAS                       |                                      |
| <b>Oficina general</b>         | <b>1,9</b>                           |
| <b>Oficinas de dibujo</b>      | <b>3,75</b>                          |
| <b>Oficinas de información</b> | <b>0,625 a 1,9</b>                   |

|                              |                   |
|------------------------------|-------------------|
| <b>BIBLIOTECA</b>            |                   |
| <b>    Archivo</b>           | <b>0,9 a 1,9</b>  |
| <b>    Salas de lectura</b>  | <b>1,9 a 3,75</b> |
| <b>    Área de mostrador</b> | <b>2,5 a 3,75</b> |
| <b>    Salas de consulta</b> | <b>1,9 a 2,5</b>  |

El nivel de iluminación de 100 lux es igual a un componente de cielo de valor 1,25% de la disposición de iluminación exterior de 8 000 lux.

El área de luz natural del componente de cielo establecido no debe ser, normalmente, menor a la mitad del área total del local.

La iluminación artificial suplementaria puede ser necesaria en los siguientes casos:

- a) cuando los niveles de iluminación natural estén por debajo de los valores requeridos para determinada tarea visual;
- b) cuando la iluminación exterior esté por debajo de la disposición de iluminación exterior establecida en la norma; y,
- c) cuando la finura de la tarea visual demande ocasionalmente, en un sitio especial, un nivel más alto de iluminación.

## ANEXO 2

### Obtención de la función de transferencia de la planta y sintonización de los parámetros del controlador PID.

En muchas ocasiones no se puede obtener teóricamente (mediante un modelo matemático) la función de transferencia de una planta, debido a diversos factores. En estos casos se puede hacer una identificación del sistema a partir de mediciones hechas a la entrada de la planta. Para este efecto, el programa MATLAB tiene una herramienta llamada SYSTEM IDENTIFICATION.

Los pasos de la identificación de sistemas pueden resumirse como:

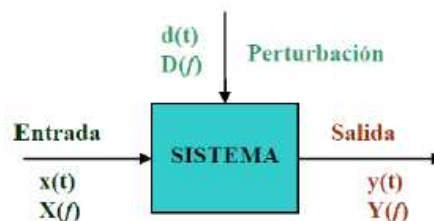
1. Obtener datos de entrada-salida.
2. Examinar y filtrar los datos.
3. Elegir familia de modelos o estructura candidata.
4. Elegir el mejor modelo (orden) dentro de una estructura, conforme a un criterio.
5. Estimar y validar un modelo.

En todo sistema se distinguen tres tipos de señales que son:

*Señales de entrada:* son aquellas señales que pueden ser controladas y de las cuales depende básicamente el funcionamiento del sistema.

*Señales de salida:* son señales que nos indican cómo se está comportando el sistema.

*Señales de perturbación:* son señales que afectan el comportamiento del sistema pero que no pueden ser controladas.

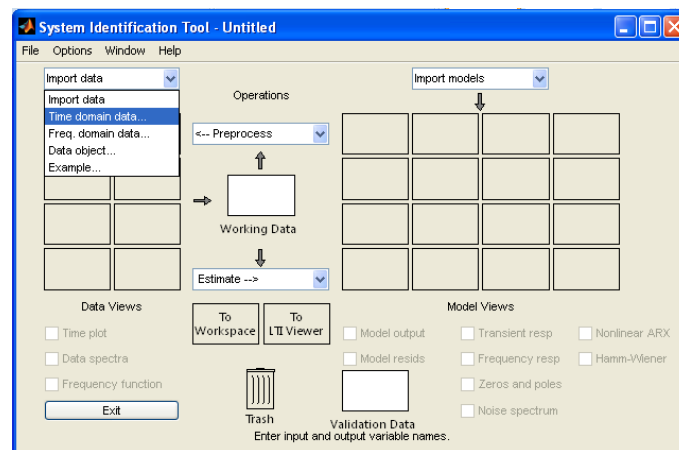




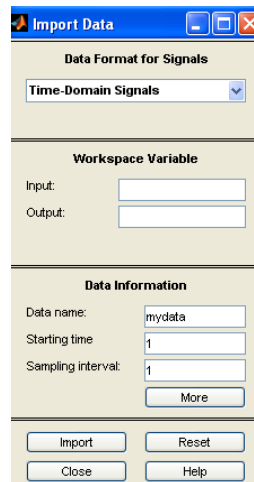
Las señales del sistema están en el dominio del tiempo pero pueden ser manipuladas matemáticamente para llevarlas al dominio de la frecuencia. Aunque, para efecto de identificación las señales son muestreadas sólo a tiempos discretos que usualmente están distanciados en unidades de tiempo. En consecuencia el problema del modelamiento es describir cómo están relacionadas las señales entre sí. La relación básica entre las señales debería ser una ecuación diferencial lineal.

Matemáticamente se nota que la salida al instante  $t$  puede ser calculada como una combinación lineal de las entradas y salidas anteriores. Esta dependencia de lo que sucedió anteriormente es lo que se entiende por dinámica. En consecuencia, el problema de la identificación de un sistema consiste en determinar los coeficientes de cualquiera de las dos ecuaciones previas.

Se empieza por digitar los vectores columna que contienen los datos correspondientes a valores de entrada y salida. Seguidamente digitar *ident* en el Workspace de Matlab, entonces se mostrará la siguiente ventana:

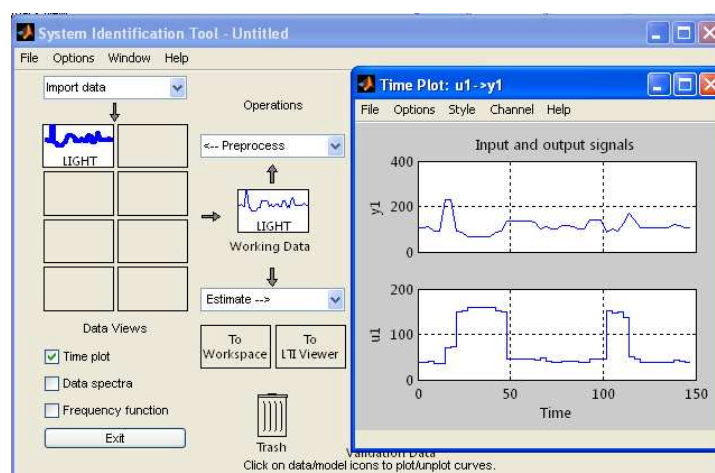


Elegir *Time domain data* para buscar un modelo en tiempo continuo. Entonces aparecerá la ventana de la figura adjunta en donde se ingresan los nombres de los vectores de entrada y salida



Es importante seleccionar adecuadamente el tiempo de muestreo (*sampling time*) pues caso contrario los datos ingresados al *ident* podrían arrojar resultados incoherentes. Al respecto existe toda una teoría desarrollada, la que rebasa el alcance de este proyecto. Para el efecto se usó un tiempo de muestreo unitario.

Luego de importar los datos de entrada-salida se irán pintando los casilleros correspondientes al *import data* . Es posible obtener una gráfica de señales de entrada y salida versus el tiempo de muestreo para analizar la relación. En el caso del prototipo se puede notar que el modelo es prácticamente no lineal, si embargo se intentó hacer una aproximación.



Se escoge la opción *Preprocess* y *estimate*. En este caso se elige un modelo de segundo orden con retardo. Obteniéndose los valores de la figura:

The screenshot shows the 'Process Models' window with the following settings:

- Model Transfer Function:**  $K \exp(-T_d s) / (1 + (2 \text{ Zeta } T_w) s + (T_w s)^2)$
- Poles:** 2, Underdamped
- Disturbance Model:** None
- Focus:** Simulation
- Iteration:** 20
- Fit:** 170
- Improvement:** 0 %
- Name:** P2DU

| Parameter       | Known                    | Value   | Initial Guess | Bounds      |
|-----------------|--------------------------|---------|---------------|-------------|
| K               | <input type="checkbox"/> | 1.0079  | Auto          | [-Inf Inf]  |
| T <sub>w</sub>  | <input type="checkbox"/> | 29.7352 | Auto          | [0.001 Inf] |
| Zeta            | <input type="checkbox"/> | 2.0062  | Auto          | [0.001 Inf] |
| T <sub>p3</sub> | <input type="checkbox"/> | 0       | 0             | [0.001 Inf] |
| T <sub>z</sub>  | <input type="checkbox"/> | 0       | 0             | [-Inf Inf]  |
| T <sub>d</sub>  | <input type="checkbox"/> | 65.722  | Auto          | [0 90]      |

**Initial Guess:** Auto-selected

**Disturbance Model:** None

**Initial state:** Auto

**Covariance:** Estimate

**Iteration:** 20

**Fit:** 170

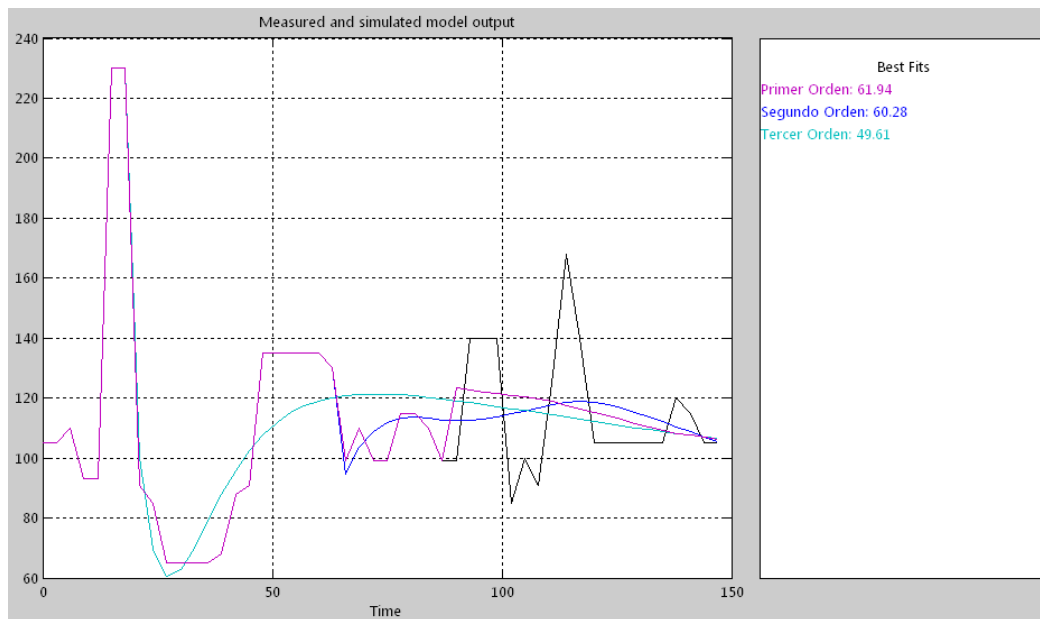
**Improvement:** 0 %

**Name:** P2DU

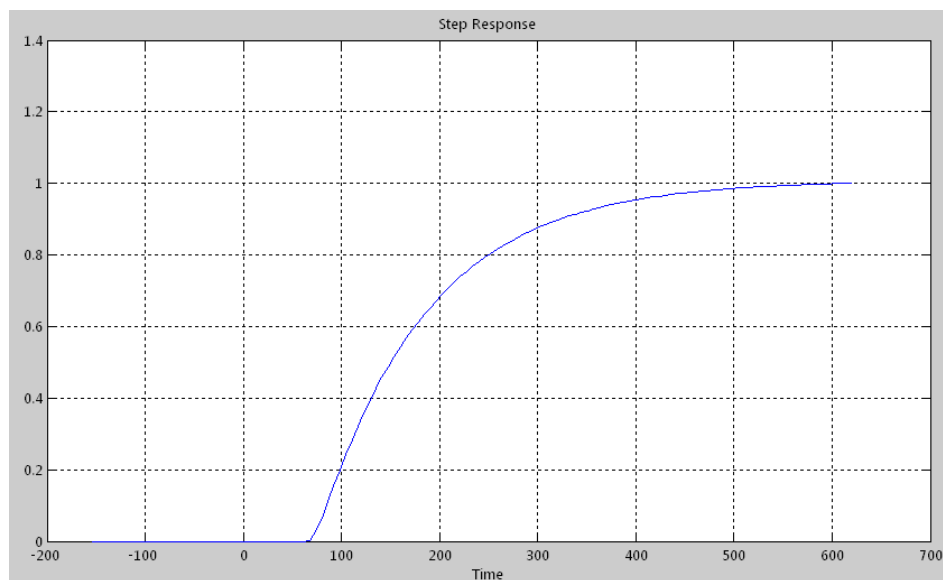
Modelo de primer orden (61.94%), segundo orden (60.8%) y tercer orden (49.61%).

La función de transferencia de la planta para un sistema de segundo orden es por tanto:

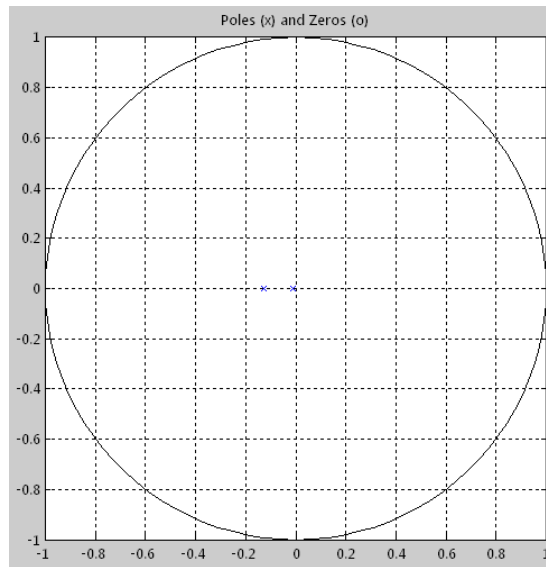
$$G P s = \frac{0.00114}{s^2 + 0.1349s + 0.001131} e^{-65.7s}$$



Un valor adecuado debe ser mayor al 85 % [10], a pesar de aquello se decidió tomar como referencia para la comparación con el control PID al modelo de segundo orden subamortiguado, pues como es bien sabido las características para un sistema de este tipo son las más analizadas.

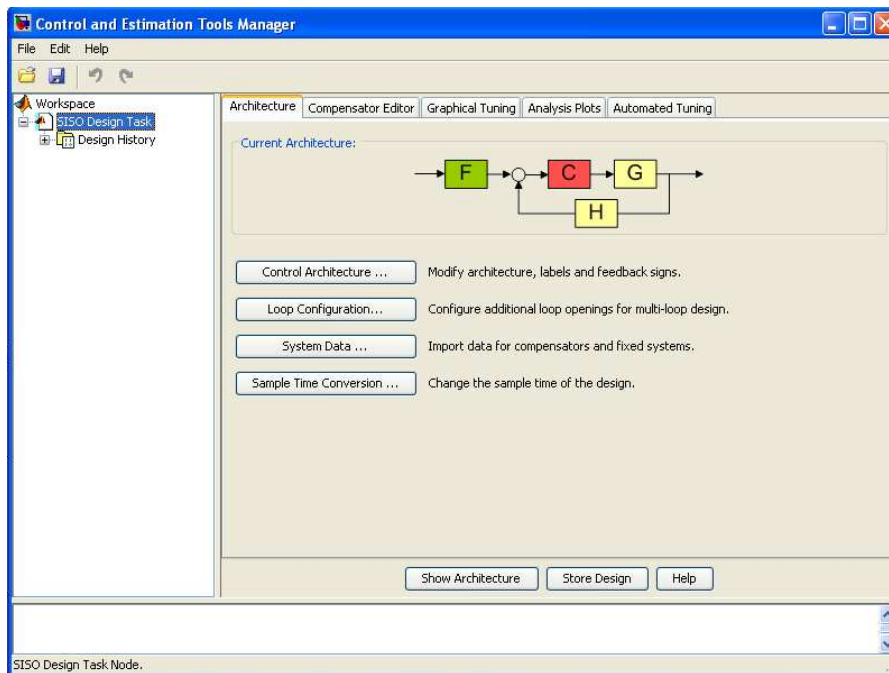


Respuesta al escalón

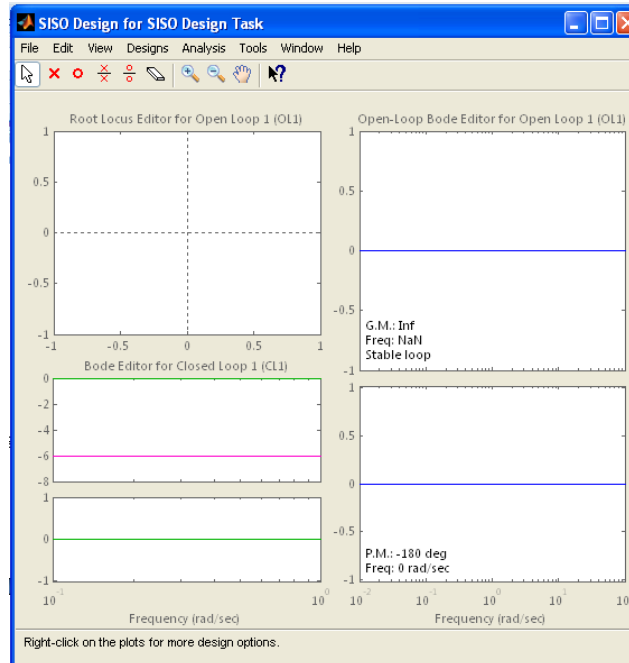


Polos y ceros del sistema

Para diseñar el control PID se hizo uso del SISOTOOL de Matlab. A esta herramienta se accede al digitar *sisotool* en el WorkSpace. Una vez ejecutado el comando, aparecerá la interfaz del usuario (*Control and Estimation Tools Manager*) cuyo aspecto se muestra a continuación.



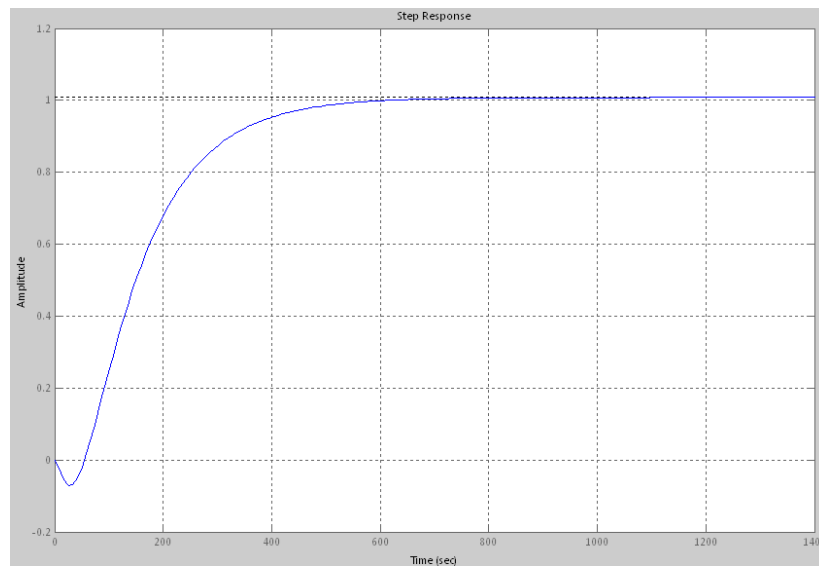
El contenido de esta ventana permite configurar todo el diseño y ajuste del sistema, así como guardar el proyecto de diseño una vez realizado o cargar un proyecto previo. Junto a la interfase de usuarios se abrirá simultáneamente la interfase gráfica de diseño (*SISO Design for SISO design task*) cuyo aspecto se muestra en la figura:



Debido a que el SISO Design Tool no puede ser usado con retrasos continuos de tiempo, se utiliza el comando *pade* para aproximarlos mediante una función de orden superior (o un modelo *LTI*), en este caso se obtiene:

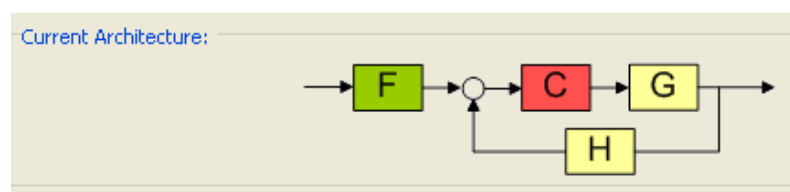
$$GP_s = \frac{-0.00114s + 3.469E - 5}{s^3 + 0.1654s^2 + 0.005237s + 3.442E - 5}$$

La respuesta al escalón, como se aprecia en la fig. ss es muy similar al modelo de segundo orden propuesto inicialmente

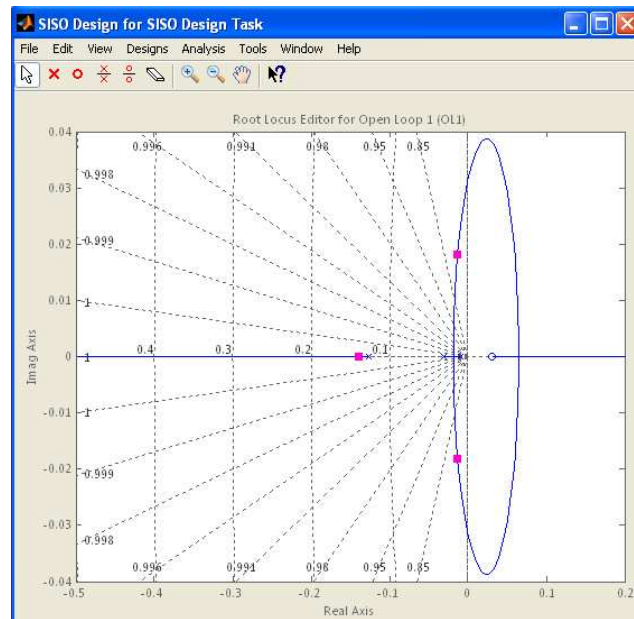


Como se puede notar este es un sistema de respuesta muy lenta. Lo cierto es que en el modelo del mismo existe un alto grado de incertidumbre, pues hasta el momento no existen funciones de transferencia o aproximaciones establecidas para sistemas de iluminación, pues la naturaleza de este tipo de sistemas es muy compleja<sup>5</sup>.

La configuración del sistema de control se muestra a continuación:

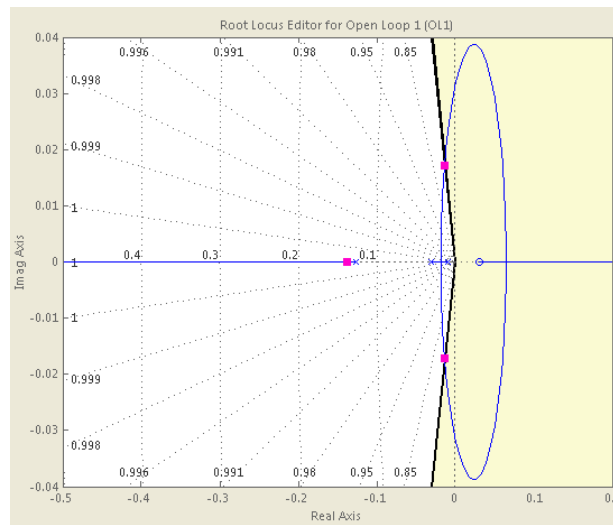


<sup>5</sup> Para consultar ecuaciones de dispositivos electrónicos se puede consultar ROLDÁN J., *Dispositivos Electrónicos*, AlfaOmega, México DF, 2002.

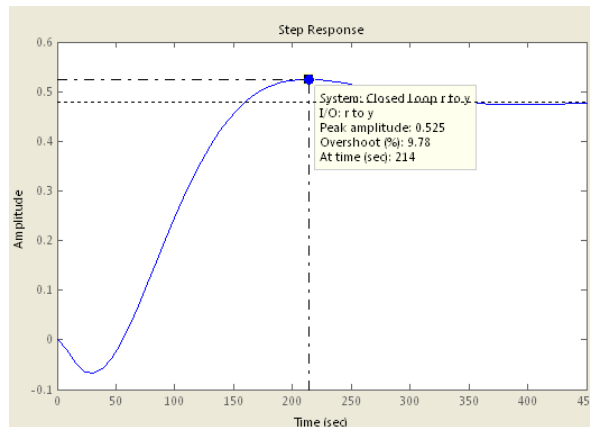


Lugar de las raíces

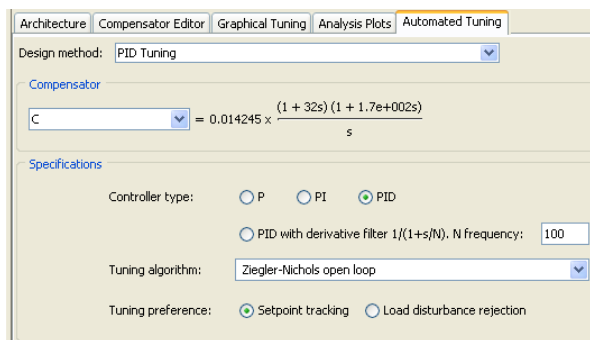
Para un sobrepaso del 10%, el valor del compensador es de 0.91.

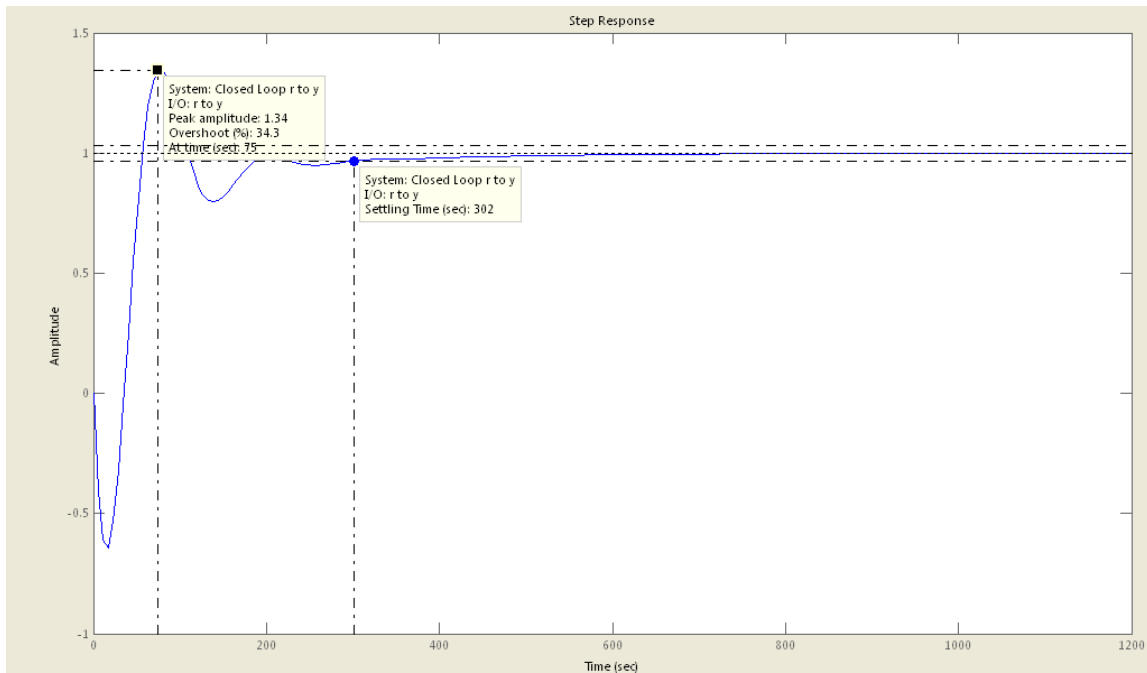






Dado que el control proporcional presenta un tiempo de asentamiento muy elevado se propone diseñar un compensador PID aplicando la herramienta *Autotuning* del *sisotool*. Para una sintonización de Ziegler-Nichols de lazo abierto se obtiene





### Con Ziegler-Nichols en lazo cerrado

Compensator

C = 0,022384 x  $\frac{(1 + 15s)(1 + 85s)}{s}$

Specifications

Controller type:  P  PI  PID

PID with derivative filter  $1/(1+s/N)$ . N frequency: 100

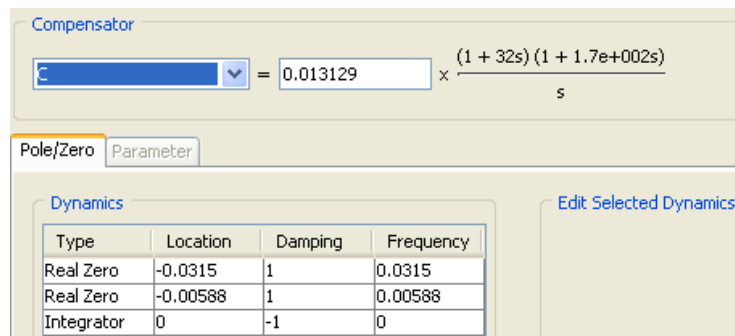
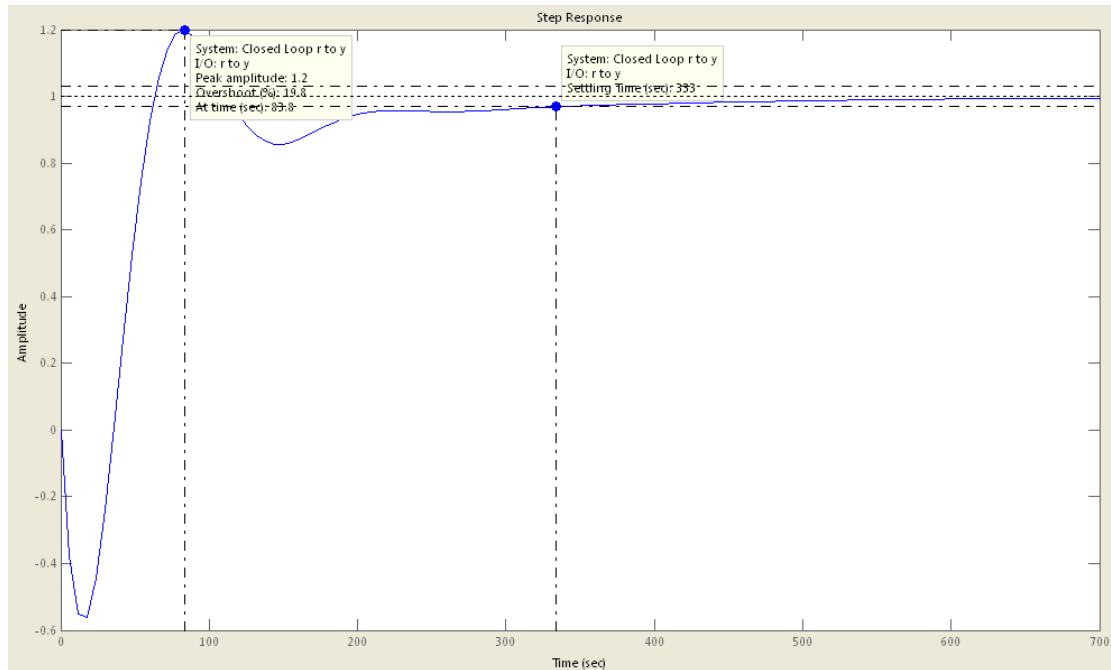
Tuning algorithm: Ziegler-Nichols closed loop

Tuning formula:  Ziegler-Nichols  Tyreus-Luyben  Astrom-Hagglund

Como se puede apreciar la auto sintonización en lazo abierto permite el mejor desempeño en cuanto a valores. El compensador PID tan solo ha permitido eliminar el error en estado estable. Se pueden hacer correcciones manualmente de los parámetros para aminorar el sobrepaso y el tiempo de asentamiento, si fuese el caso.

Los mejores resultados que se alcanzan son los que se muestran en la gráfica adjunta Donde se han alcanzado un sobrepaso del 19.8% y un tiempo de asentamiento de 333 segundos. De todos modos existe una zona negativa que no

es normal en un sistema de control, el mismo se da en un tiempo aproximado de 50 segundos.



Es decir la función de transferencia del controlador PID es:

$$GC_s = \frac{0.00714s^2 + 0.42035s + 0.013129}{s}$$

$$GC_s = 0.42035 + \frac{0.013129}{s} + 0.00714s$$

## ANEXO 3:

### Programa implementado en Matlab para el control borroso

- **Inicialización de las variables internas del Modo grafico.**

```
function varargout = Control_Difuso(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @Control_Difuso_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn', @Control_Difuso_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn', [] , ...
'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
[varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

- **Inicialización del Modo Grafico, se ejecuta una sola vez cuando se ingresa al programa.**

```
function Control_Difuso_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

RS232=instrfind;
if RS232~=isempty(RS232)
fclose(RS232);
delete(RS232);
clear RS232;
end

% Ingreso de imágenes de la interfaz.

axes(handles.f1)
background = imread('buolibro.jpg');
axis off;
imshow(background);
axes(handles.imtreal)
background = imread('remote-control-touch-desk-lamp-10133780306.jpg');
axis off;
imshow(background);
axes(handles.imcontrol)
background = imread('sperficie.jpg');
axis off;
imshow(background);
axes(handles.dn)
background = imread('dianoche.jpg');
axis off;
```

```
imshow(background);
```

```
% Seteo Variables
```

```
set(handles.indilum,'String',0);
set(handles.indpersonas,'String',0);
set(handles.indhorario,'String','Dia/Noche');
handles.set_ilum=0;
handles.set_per=0;
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
```

```
function varargout = Control_Difuso_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;
```

- **Cierre del programa.**

```
function cerrar_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
opc=questdlg('¿Desea salir del programa?','Control Iluminación
','Si','No','No');
if strcmp(opc,'No')
return;
end
```

```
% Permite escoger guardar o no los datos tomados.
```

```
guardar=questdlg('¿Desea guardar los Datos?','Control Iluminación
','Si','No','Si');
if strcmp(guardar,'Si')
d={'Tiempo','% Iluminacion',' ','Control'};
xlswrite('Historico',d,'Sheet1','A2')
xlswrite('Historico',tiempo,'Sheet1','A4')
xlswrite('Historico',ilum,'Sheet1','B4')
xlswrite('Historico',control,'Sheet1','D4')
end
clear,clc,close all
```

- **Función de Ayuda permite abrir el archivo de ayuda.**

```
function Ayuda_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
winopen('AYUDA.pdf')
```

- **Función de Información permite abrir el archivo de información.**

```
function info_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
winopen('INFORMACION.pdf')
```

- **Función de cambio del Puerto a utilizar.**

```
function spuerto_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
opc=questdlg('¿Desea cambiar el Puerto?','Control Iluminación
','Si','No','No');
```

```

if strcmp(opc, 'No')
return;
else
set(handles.parar, 'State', 'on');
end
set(handles.tituloF, 'Visible', 'off');
set(handles.INDFILE, 'Visible', 'off');
set(handles.INDPUERTOS, 'Visible', 'on');
set(handles.tituloP, 'Visible', 'on');

```

- **Ingreso al código del Programa.**

```

function codigo_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
password= inputdlg('Ingrese la contraseña', 'Verificacion de Usuario', 1)
if strcmp(password, '123456789') % Clave de ingreso
winopen('INFORMACION.pdf');
elseif isempty(password)
else
error('Contraseña incorrecta', ' Error ');
return
end

```

- **Selección del Modo de Trabajo.**

```

function uipanel3_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
if ( hObject==handles.interno)
handles.modo=1
guidata(hObject, handles);
elseif ( hObject==handles.externo)
handles.modo=0
guidata(hObject, handles);
end

```

- **Cambio de las variables Iluminación y No de Personas.**

```

function iluminacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.set_ilum=round(get(hObject, 'Value'));
set(handles.indilum, 'String', handles.set_ilum);
guidata(hObject, handles);
function personas_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.set_per=round(get(hObject, 'Value'));
set(handles.indpersonas, 'String', handles.set_per);
guidata(hObject, handles);

```

- **Inicio del control**

```

function play_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)

%% Se eliminan los puertos abiertos del computador.
RS232=instrfind;
if RS232~=isempty(RS232)
fclose(RS232);
delete(RS232);
clear RS232;

```

```

end
%% Se obtiene y se escribe información del Puerto usado.
set(handles.INDPUERTOS, 'Visible', 'off');
set(handles.titulop, 'Visible', 'off');
set(handles.INDFILE, 'Visible', 'on');
set(handles.tituloof, 'Visible', 'on');
SPuerto=get(handles.INDPUERTOS, 'String');
set(handles.INDPUERTO, 'String', SPuerto)
Puerto=get(handles.INDPUERTO, 'String');

%% Inicialización de la comunicación.
RS232 =
serial(Puerto, 'BaudRate', 9600, 'DataBits', 8, 'Parity', 'none', 'StopBits', 1);
fopen(RS232);

%% Inicialización de las variables.
aux=0;
n=1;
ldr=0;
personas=0;
dino=0;
numero=0;
num='';
set(handles.parar, 'State', 'off');
paro=get(handles.parar, 'State');
fwrite(RS232, 'r');

%% Bucle del Control

while (strcmp(paro, 'off'))

%% Obtiene variables del programa

aux=aux+1;
paro=get(handles.parar, 'State');
pausa=get(handles.pausa, 'State');
minterno=get(handles.interno, 'Value');
mexterno=get(handles.externo, 'Value');

%%Adquisición de las variables de entrada desde el microcontrolador.

if mexterno==1
palabra=fscanf(RS232);
tamano=length(palabra);
for i=2:tamano
num(i-1)=palabra(i);
end
numero=str2double(num);

if (palabra(1)=='l')
ldr=numero;
end
if(palabra(1)=='p')
personas=numero;
end

```

```

if(palabra(1)=='k')
dino=numero
end

end
ilum(aux)=ldr;
per=personas;

%% Adquisición de las variables de entrada desde la interfaz.

if minterno==1
ilum(aux)=get(handles.iluminacion,'Value');
per=get(handles.personas,'Value');
end

%%Indica el Estado Día/Noche en el Programa.

if dino==0
axes(handles.dn)
background = imread('dia.jpg');
imshow(background);
set(handles.indhorario,'String','Dia');
end
if dino==1
axes(handles.dn)
background = imread('noche.jpg');
imshow(background);
set(handles.indhorario,'String','Noche');
end

%% Realiza una Pausa en el Programa.

if strcmp(pausa,'on')
f=helpdlg('El Control difuso se encuentra en pausa Presione Ok para
Continuar ',' Control Difuso ');
waitfor(f)
set(handles.pausa,'State','off');
end
%% Control Difuso

LF=get(handles.INDFUZZY,'String'); % Lectura del archivo.Fis del control
                                difuso
membresias=readfis(LF);
control(aux)=evalfis([ilum(aux),per],membresias);

%% Imprime los valores de Iluminación, No Personas y Control en La
interfaz Grafica.

set(handles.indentilum,'String',round(ilum(aux)));
set(handles.indentper,'String',round(per));
set(handles.indcontrol,'String',round(control(aux)));

```



```
%% Envío de la señal control hacia el microcontrolador
```

```
dato=control(aux);
s=int2str(dato);
l=length(s);
for i=1:l
envio= mod(dato,10);
matriz(i)=envio;
dato=dato/10;
dato=floor(dato);
end
```

```
for i=l:-1:0
if(i==0)
fwrite(RS232,'e');
pause(0.01);
else
f=int2str(matriz(i));
fwrite(RS232,f);
pause(0.01);
end
end
matriz=0;
```

```
num='';
tiempo(aux)=aux*0.5;
```

```
%% Graficas de La Iluminación y Control en Tiempo Real
```

```
axes(handles.imtreal)
plot(tiempo,ilum);
title('Iluminacion vs Tiempo','Color',[1 1 1]);
limitemax=tiempo(aux);
if limitemax>30
limitemin=limitemax-20;
else
limitemin=0;
end
AXIS([limitemin limitemax 0 255])
grid on
```

```
axes(handles.imcontrol)
plot(tiempo,control)
title('Control vs Tiempo','Color',[1 1 1]);
limitemax=tiempo(aux);
if limitemax>30
limitemin=limitemax-20;
else
limitemin=0;
end
AXIS([limitemin limitemax 0 255])
grid on
```

```
end
```

- **Imprime las imágenes.**

```
axes(handles.imtreal)
background = imread('remote-control-touch-desk-lamp-10133780306.jpg');
imshow(background);
axes(handles.imcontrol)
background = imread('superficie.jpg');
imshow(background);
```

- **Opción de Guardar los Datos del Control**

```
guardar=questdlg('¿Desea guardar los Datos?', 'Control Iluminación', 'Si', 'No', 'Si');
if strcmp(guardar, 'Si')
d={'Tiempo', '% Iluminacion', ' ', 'Control'};
xlswrite('Historico', d, 'Sheet1', 'A2')
xlswrite('Historico', tiempo, 'Sheet1', 'A4')
xlswrite('Historico', ilum, 'Sheet1', 'B4')
xlswrite('Historico', control, 'Sheet1', 'D4')
end
```

- **Cierra el Puerto y elimina las variables Guardadas.**

```
fwrite(RS232, 's');
fclose(RS232);
delete(RS232);
clear RS232;
clear all
clc
```

**%% Función para Abrir el Archivo. Fis del Control Difuso.**

```
function uipushtool1_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.pausa, 'State', 'on')
[FileName Path]=uigetfile({'*.fis'}, 'Abrir documento');
if isequal(FileName, 0)
return
else
F=strcat(Path, FileName)
set(handles.INDFUZZY, 'String', F)
set(handles.INDFILE, 'String', FileName)
end
```

## ANEXO 4:

# Manual de Ayuda del Usuario

---

## Contenido

|  |     |
|--|-----|
| Interfaz Gráfica del Control Difuso de Iluminación ..... | 124 |
| 1. Menú .....  | 125 |
| 1.1. Cargar Archivo .....                                | 125 |
| 1.2. Ejecutar .....                                      | 125 |
| 1.3. Pausar .....  | 125 |
| 1.4. Detener/Stop .....                                  | 126 |
| 1.5. Visualización del Código (.m) .....                 | 126 |
| 1.6. Selección del Puerto de Comunicación .....          | 127 |
| 1.7. Información.....                                    | 128 |
| 1.8. Ayuda .....   | 128 |
| 1.9. Cerrar .....  | 128 |
| 2. Gráficas en Tiempo Real del Proceso.....              | 129 |
| 3. Controladores e Indicadores .....                     | 129 |
| 3.1 Modos de Trabajo .....                               | 129 |
| 3.2 Variables de Funcionamiento .....                    | 130 |
| 3.3 Entradas al Control Difuso .....                     | 130 |
| 3.4 Salida del Control Difuso .....                      | 130 |
| 3.5 Puerto y Control en Uso .....                        | 131 |
| 3.4 Horario.....   | 131 |
| 4. Planta del Control Difuso de Iluminación .....        | 132 |
| 5. Panel de Control .....                                | 133 |
| 5.1 Inicio .....   | 133 |
| 5.2 Reset.....   | 134 |
| 5.3 Contactos Normalmente Cerrados .....                 | 134 |
| 5.4 Personas (+/-) .....                                 | 135 |
| 5.5 LCD .....  | 135 |
| 5.6 Resolución LCD .....                                 | 135 |
| 5.7 Sensor Luz.....                                      | 136 |
| 5.8 Sensor Día- Noche .....                              | 136 |
| 5.9 Sensibilidad Día-Noche .....                         | 137 |

5.10 Comunicación Serial DB9-RS232..... 137  
 5.11 Actuador (Foco Dicroico de 120 V)..... 137

## Interfaz Gráfica del Control Difuso de Iluminación

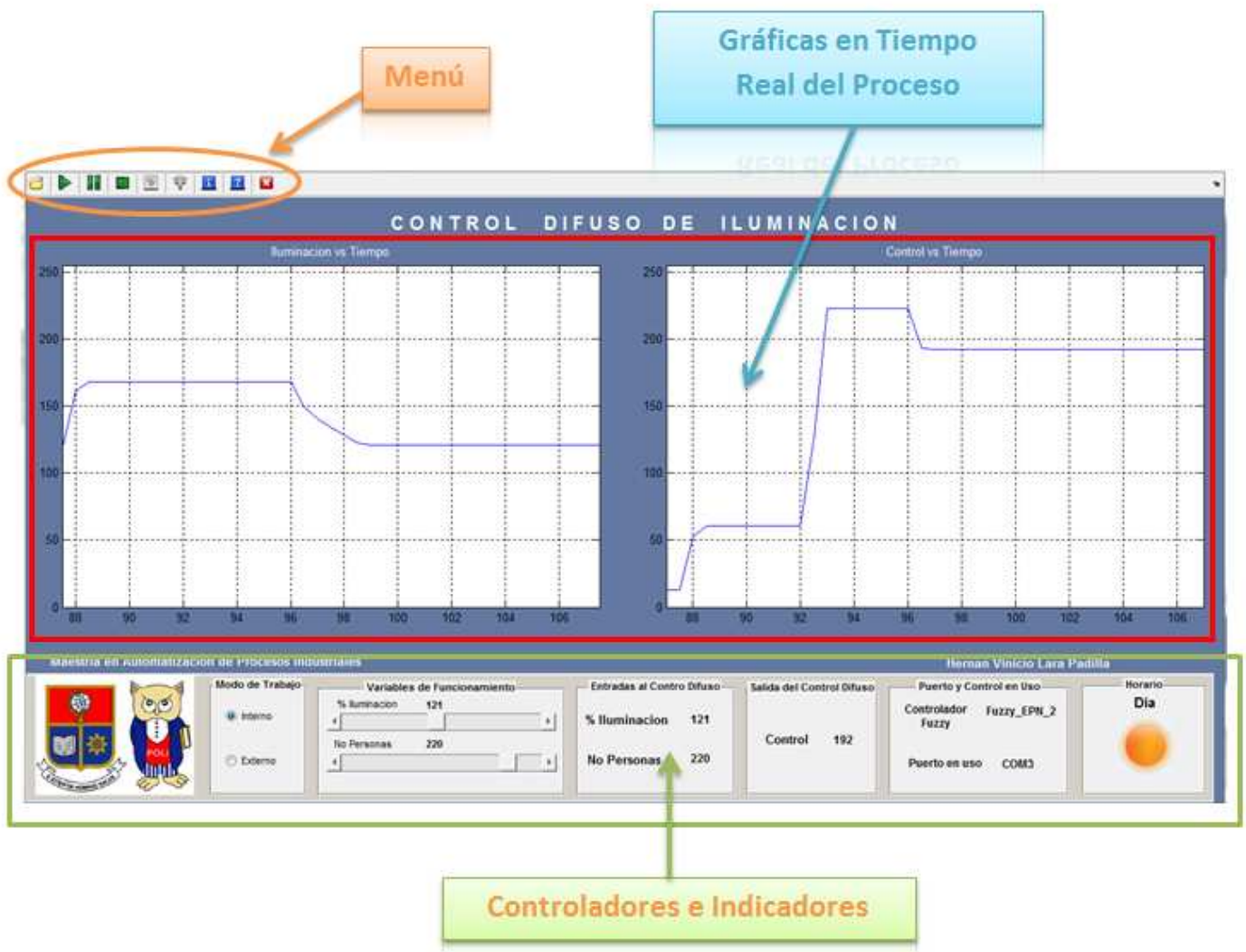


Fig. 1 Interfaz Gráfica del Controlador Difuso de Iluminación.

## 1. Menú



Fig.2 Barra de Menú

[Top of the Document](#)

1.1. **Cargar Archivo** → 

Permite abrir un archivo (\*.fis), con el que trabajara el controlador difuso (Fig. 3).

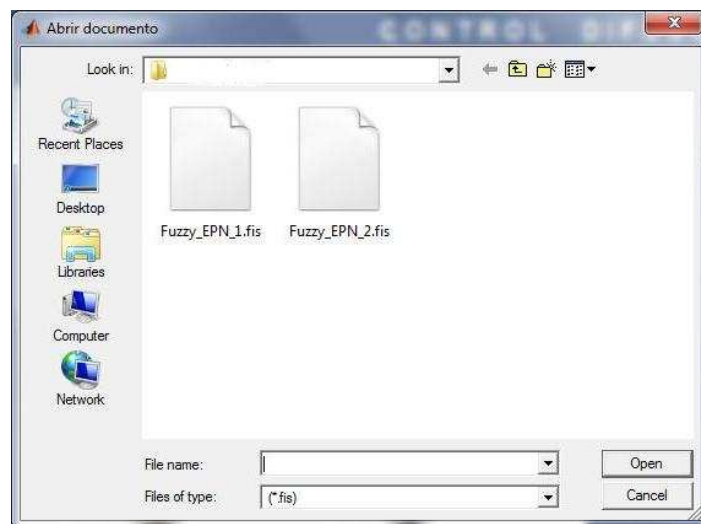


Fig. 3 Ventana Abrir Archivo

[Top of the Document](#)

1.2. **Ejecutar** → 

Permite ejecutar el programa del Controlador Difuso

[Top of the Document](#)

1.3. **Pausar** → 

Permite pausar la ejecución del programa.

Aparecerá una ventana, la cual indicara que el control difuso se encuentra pausado, para continuar con la ejecución del programa se deberá presionar OK (Fig. 4)

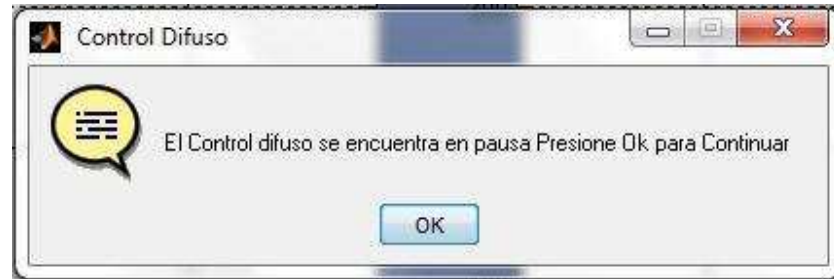


Fig. 4 Ventana Control Difuso en Pausa

[Top of the Document](#)

#### 1.4. Detener/Stop →

Detiene la ejecución del programa del Controlador Difuso.

Aparecerá una ventana (Fig. 5), la cual preguntara si se requiere guardar los datos del Control antes de su detención. Al aceptar (Opción "Si") los datos del Control serán guardados en un archivo histórico de Excel, por el otro lado al no aceptar (Opción "No") los datos no se guardaran.\*



Fig. 5 Ventana Guardar Datos

\* Se borrarán los datos de Matlab sin importar la opción que se escoja en la ventana "Guardar Datos" (Fig. 5)

[Top of the Document](#)

#### 1.5. Visualización del Código (.m) →

Permite la visualización del código del programa realizado en Matlab, para la cual se requiere del ingreso de una contraseña (Fig. 6). \*\*



Fig. 6 Ingreso Contraseña

\*\* No se permite la edición del Código de Programación

[Top of the Document](#)

### 1.6. Selección del Puerto de Comunicación →



Permite cambiar el Puerto de Comunicación con el que trabajara el controlador difuso.

Aparecerá una ventana (Fig. 7), la cual indicara el cambio del Puerto de Comunicación, al aceptar se permitirá editar el puerto a trabajar (Fig. 8). \*\*\*



Fig. 7 Ventana Cambio de Puerto de Comunicación



Fig. 8 Ingreso del Puerto de Comunicación

\*\*\* Ingresar el Puerto de Comunicación en MAYUSCULAS, seguido de un click izquierdo fuera del editor de texto. Una vez cambiado el puerto dar "Play" (1.2.) para ejecutar el programa.

[Top of the Document](#)

1.7. **Información** → 

Permite la visualización de un documento, en el cual se indica información del Controlador Difuso. Dentro de la información se encuentra la persona quien realizó el programa, la justificación del Proyecto y su versión.

[Top of the Document](#)

1.8. **Ayuda** → 

Permite la visualización de un documento, en el cual se encontrara un Manual de Ayuda para el buen uso del programa por parte del usuario.

[Top of the Document](#)

1.9. **Cerrar** → 

Permite cerrar y salir del programa, aparecerá una ventana donde se indicara si se desea salir, al aceptar (Opción "Si") se mostrara una segunda ventana en la cual nos permitirá guardar datos del programa del controlador difuso.



Fig. 9 Ventana Cerrar Programa

[Top of the Document](#)



## 2. Gráficas en Tiempo Real del Proceso

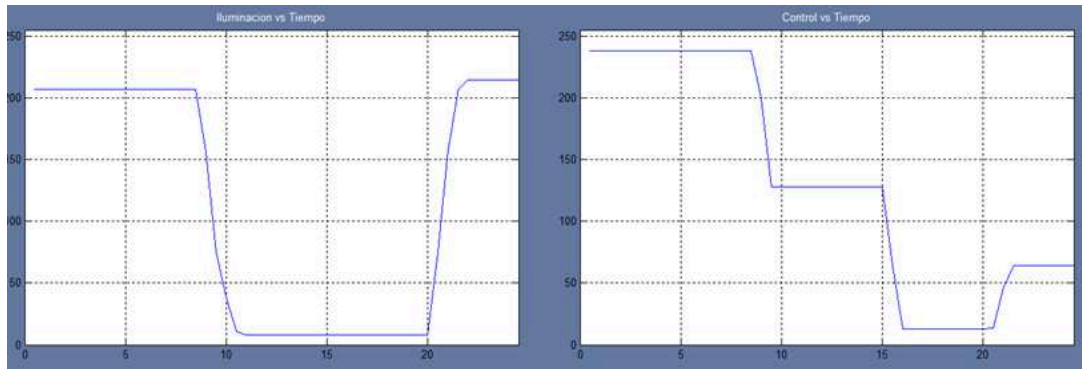


Fig. 10 Graficas de la Iluminación y Control en Tiempo Real

- En la Gráfica de la izquierda se indica la variación de la Iluminación vs Tiempo.
- En la Gráfica de la derecha se indica la variación del Control vs Tiempo.

[Top of the Document](#)

## 3. Controladores e Indicadores

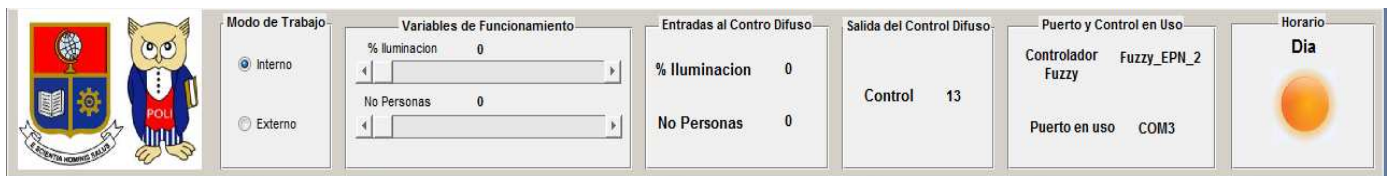


Fig. 11 Panel de Controladores e Indicadores

[Top of the Document](#)

### 3.1 Modo de Trabajo

Permite escoger la conexión de las entradas hacia el Controlador Difuso (Fig. 12).

- **Modo Interno.**- El cambio del valor de las entradas (Iluminación y No de personas), se las realizara por medio de 2 sliders ubicados en la interfaz.
- **Modo Externo.**-El microcontrolador envía el valor de las entradas hacia la interfaz, por medio de una conexión serial.

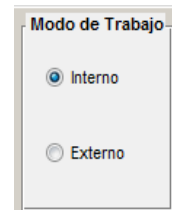


Fig. 12 Modo de Trabajo

En los dos modos de trabajo el actuador (Foco), cambia su estado, según la señal de control

[Top of the Document](#)

### 1.31.1 3.2 Variables de Funcionamiento

Permite variar las entradas de Iluminación y número de personas, cuando el sistema se encuentre en Modo de trabajo Interno (Fig. 13).

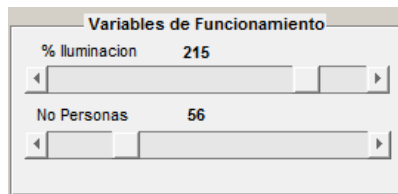


Fig. 13 Variables de Funcionamiento

[Top of the Document](#)

### 1.31.2 3.3 Entradas al Control Difuso

Indicador de las entradas al Control Difuso, sin importar el modo de trabajo en el que se encuentre el proceso (Fig. 14).

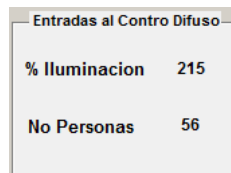
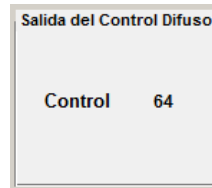


Fig. 14 Entradas al Control Difuso.

[Top of the Document](#)

### 1.31.3 3.4 Salida del Control Difuso

Indicador de la salida del Controlador Difuso, la misma que es la señal de control del actuador (Fig. 15).

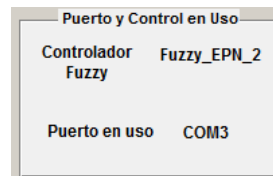


*Fig. 15 Salidas del Control Difuso*

[Top of the Document](#)

### 1.31.4 3.5 Puerto y Control en Uso

Indicadores del nombre archivo del Control Difuso y del Puerto en Uso en ese momento (*Fig. 16*).



*Fig. 16 Puerto y Control en Uso*

[Top of the Document](#)

### 1.31.5 3.4 Horario

Indicador del horario de funcionamiento, del control, el cual puede ser Noche o Día, la señal que realiza este cambio es recibida del microcontrolador (*Fig. 17*).



*Fig. 17 Horario de Uso del Controlador*

[Top of the Document](#)

#### 4. Planta del Control Difuso de Iluminación



*Fig. 18 Planta de Iluminación.*

[Top of the Document](#)

## 5. Panel de Control



*Fig.19 Panel de control*

[Top of the Document](#)

### 1.31.6 5.1 Inicio

Es el pulsador de encendido de la planta, todos los componentes de la misma (Microcontrolador, LCD, Actuador etc.) se energizaran y estarán listos para su funcionamiento.



*Fig. 20 Pulsador de Inicio.*

[Top of the Document](#)

### 1.31.7 5.2 Reset

Permite reiniciar el sistema, ante cualquier eventualidad, estas pueden ser pérdidas de la comunicación, o mal funcionamiento de la planta.



*Fig. 21 Pulsador para Reiniciar el Sistema.*

[Top of the Document](#)

### 1.31.8 5.3 Contactos Normalmente Cerrados

En el control Difuso de Iluminación, estos contactos no presentan ningún funcionamiento, sin embargo pueden ser utilizados como entradas, para proyectos futuros.



*Fig. 22 Pulsador normalmente cerrado.*

[Top of the Document](#)

### 1.31.9 5.4 Personas (+/-)

Son sensores Fotoeléctricos, los cuales permiten incrementar o decrementar el número de personas al sistema, para lo cual se debe pasar un objeto entre sus pestañas.



Fig. 23 Sensores Fotoeléctricos para el ingreso de Personas.

[Top of the Document](#)

### 1.31.10 5.5 LCD

Indicador de las variables del Proceso, (Numero de Personas, Ldr, Control, Dia, noche), en él se indican los valores que cada variable presenta.



Fig. 24 Visualización de las variables en la LCD

[Top of the Document](#)

### 1.31.11 5.6 Resolución LCD

Permite cambiar el contraste de la LCD.



*Fig. 25 Perilla que permite el cambio de contraste en la LCD.*

[Top of the Document](#)

### **1.31.12 5.7 Sensor Luz**

El cual es una LDR, sensor que varía su resistencia dependiendo al nivel de Luz, entrega la variación de luz en la zona de trabajo.



*Fig. 26 Sensor de Luz (LDR).*

[Top of the Document](#)

### **1.31.13 5.8 Sensor Día- Noche**

El cual es una LDR, capta el nivel de luz del ambiente, reconocer si es de día o de noche, dependiendo de la cantidad de luz.



*Fig. 27 Sensor de Luz (LDR).*

[Top of the Document](#)



### 1.31.14 5.9 Sensibilidad Día-Noche

Permite modificar el rango de Luz en el que el sistema trabaja como de día o de noche.



Fig. 27 Perilla que permite trabajar el rango de luz.

[Top of the Document](#)

### 1.31.15 5.10 Comunicación Serial DB9-RS232.

Permite la comunicación entre la Planta y el controlador, para lo cual se necesita un cable Serial a USB, el mismo que permite realizar una comunicación serial utilizando los puertos USB.



Fig. 28 Cable Serial-Usb, DB9-RS232.

[Top of the Document](#)

### 1.31.16 5.11 Actuador (Foco Dicroico de 120 V)

Permite el cambio de Luz en la zona de trabajo, el actuador cambia su porcentaje de luminosidad, por medio de una señal de control enviada desde el computador.

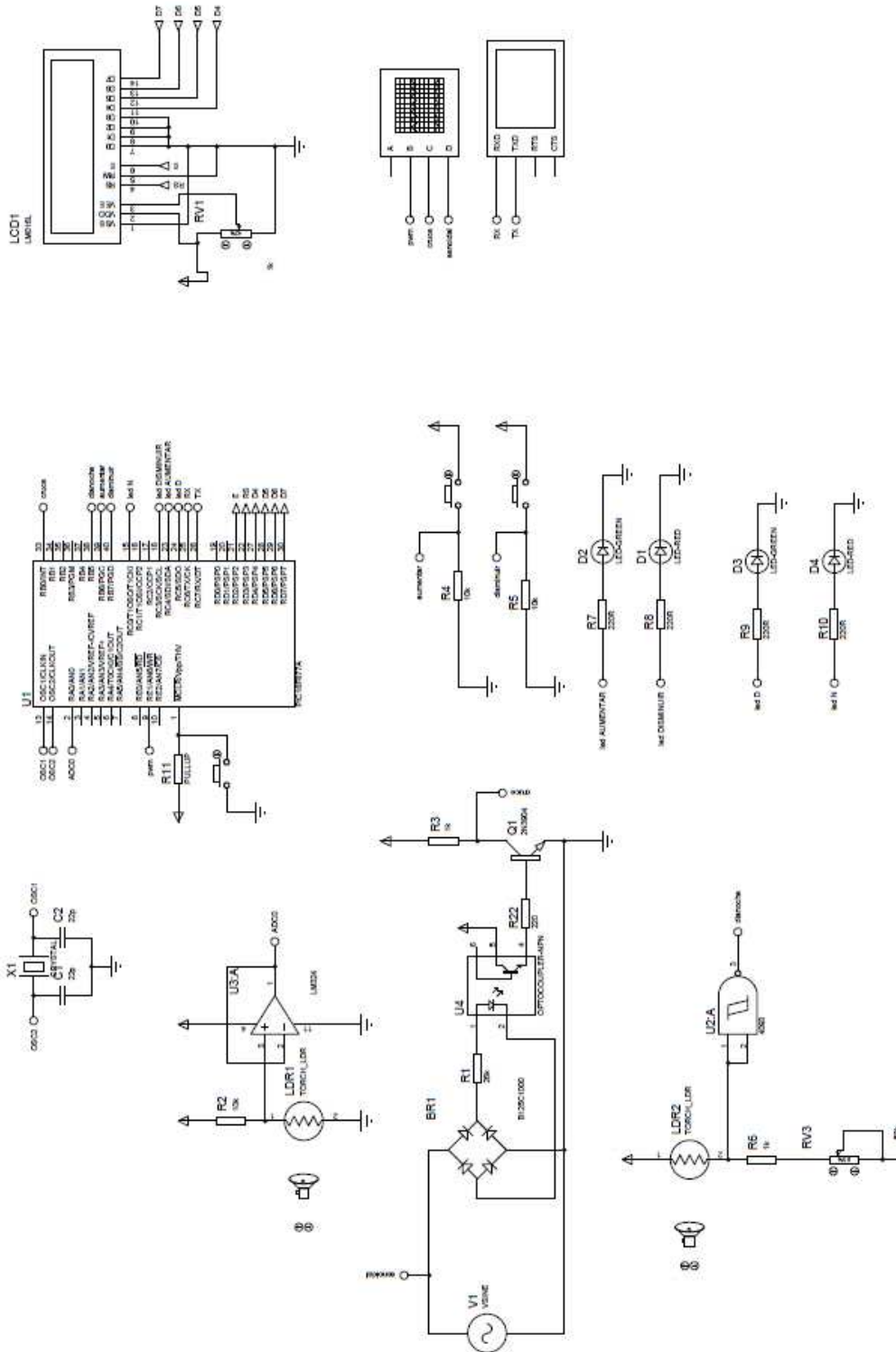


*Fig. 29 Actuador (Foco Dicroico).*

[Top of the Document](#)

### ANEXO 5:

### Esquema electrónico del prototipo



## ANEXO 6:

### Ayuda instalación cable de comunicación USB-SERIAL

# USB-Serial Cable User Guide

1. [Product Features](#)
2. [System Requirements](#)
3. [Driver Installation](#)
4. [Changes COM Port](#)
5. [Setting Up the RS232 Serial Device](#)
6. [Uninstalling the Driver Program](#)

#### Product Features

- USB Specification Rev. 1.1 compliant
- Support the RS232 Serial interface
- Over 1Mbps data transfer rate
- Support remote wake-up and power management

#### System Requirements

- IBM PC 486DX4-100 MHz CPU or higher or compatible system
- Available USB port
- CD-ROM drive
- Windows 2000

#### Driver Installation (WIN2000)

Follow the steps below to install Window 2000 driver of USB-Serial cable:

1. Power on your computer and make sure that the USB port is enabled and working properly.
2. During installation , please don't link USB-Serial cable with your computer .
3. Double click ' setup.exe ' , then it will start install



4. After installation , click ' OK '

5. Plug in the USB-Serial cable into the USB port and run the **Found New Hardware Wizard** to assist you in setting up the new device. Click **Next** to continue.



6. click Next to continue. Select the “ **Search for a suitable driver for my device(recommand)** “



7. Windows will detect the driver and Click Next to continue installation.



8. Click Finish to continue and let Windows copy the needed files to your hard disk.



9. You can to check the Device Manager and see the Prolific USB to Serial Comm Port)



## Changes COM Port

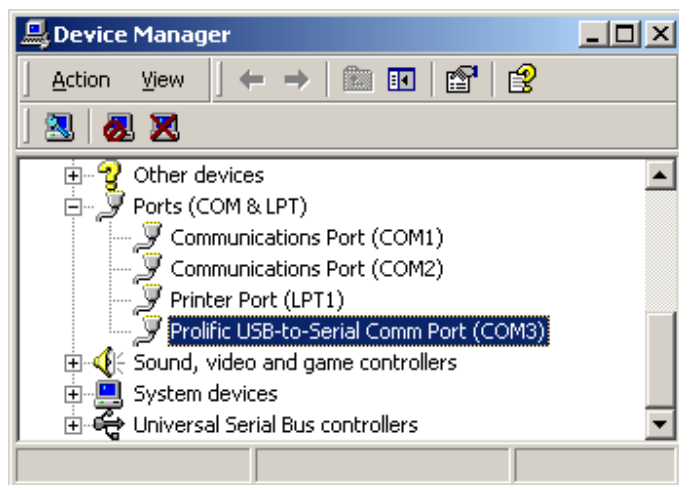


Under Windows 98SE , you can change the COM Port via **setcom.exe**  software

7. Under Windows Me 、 Windows 2000 、 Windows XP, please kindly following the steps as below. :

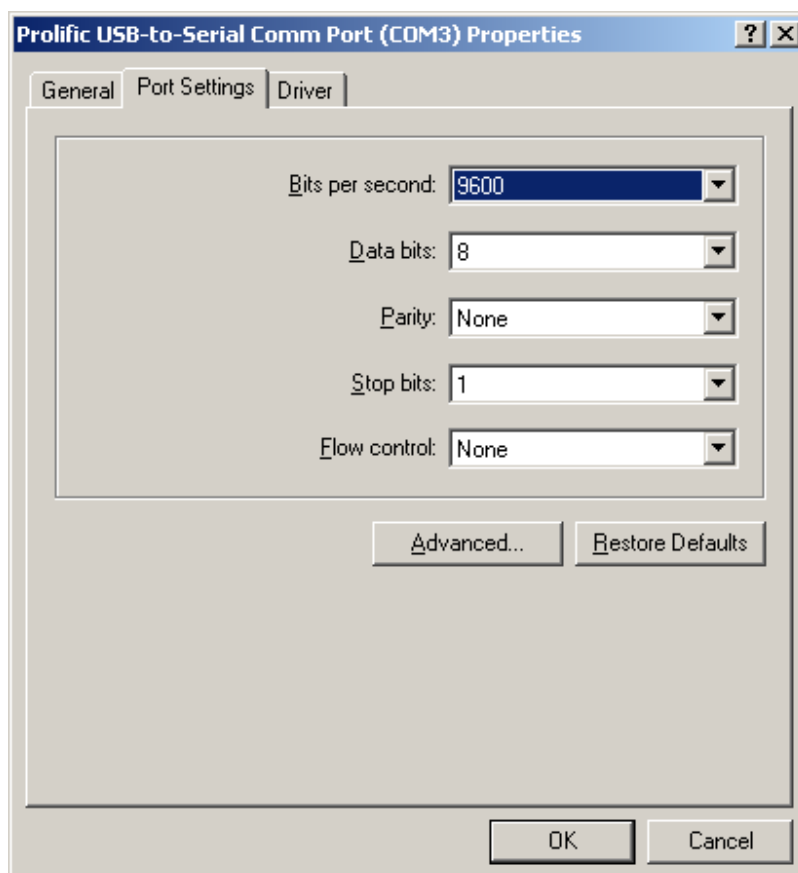
(1) Please click on the **Device Manager\ Devices by connection \ ports (COM & LPT)**. ( images 1)





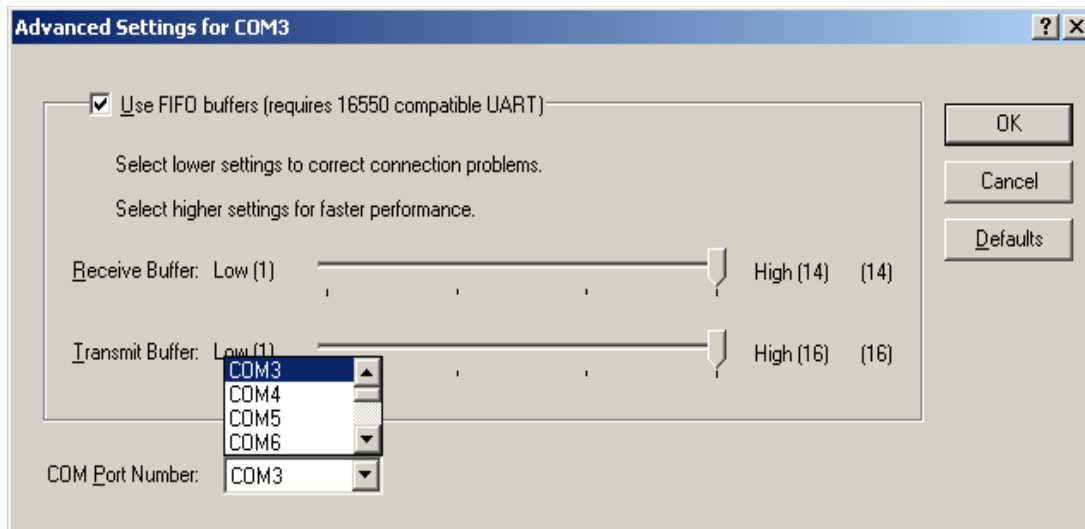
( images 1)

(2) Doubly click on "Prolific USB-to- serial Comm port(COM3)" .And it could go to ' properties'.  
(images 2)



(images 2)

(3) Please choose "**Port Settings**", and then click on "**Advanced**". Please kindly choose the needed com, and click on "**ok**". (images 3)



(images 3)

Notice:

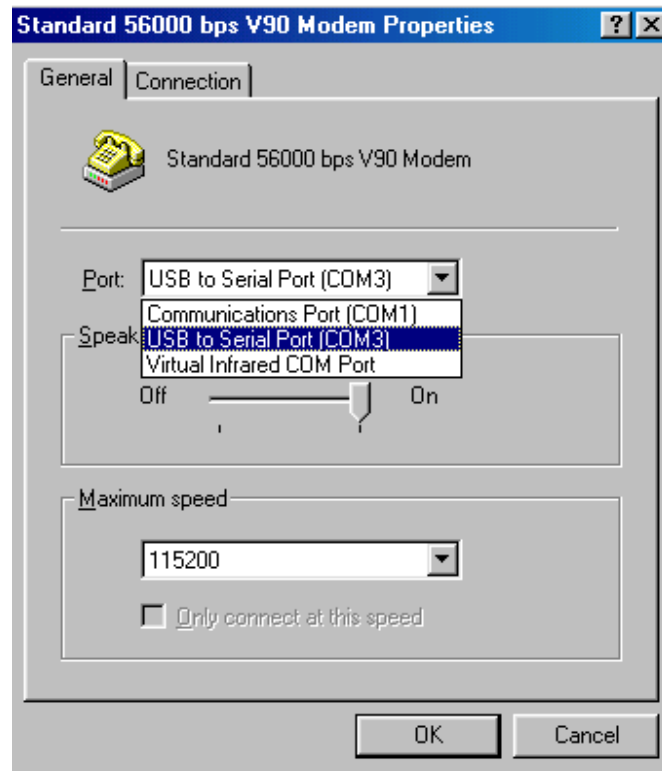
**If the Modem could not link with the new port, and run smoothly when changed the port, please kindly unload Modem, and re-install it.**

**When Changing the port, the peripheral equipment could not shift to the new port, and run smoothly. Under this situation, please kindly unload the equipment and install again.**

### Setting Up the RS232 Serial Device

Follow the steps below to connect your RS232 Serial Device (ie: Modem) to the USB port of your PC:

1. Turn off your Modem. Plug the DB 9 connector of the USB-Serial cable into your Modem. Turn on the Modem afterwards.
2. Turn on your computer and plug in the USB connector of the USB-Serial cable into the USB port.
3. If you have already installed a Modem device before, click Start, Settings, Modems. Open Modems Properties, select the Modem, click Properties. In General tab, please change the **Port** value to **USB to Serial Port (COM3)**.
4. After finishing these processes, you can use USB to Serial Bridge Cable to connect RS232 Serial 56K FAX Modem and execute the Dial-up function to connect Internet, and send the FAX with the FAX software (ie: Microsoft FAX) properly.



### Uninstalling the Driver Program

If you want to remove the USB-Serial cable driver program, you can uninstall it by following the steps below:

1. Unplug the USB-Serial cable from your PC.
2. Run the **DRemover98\_2K.exe** program from the software CD-ROM, then reboot the PC.

