



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

**Controlador híbrido de iluminación aplicado a un fitotrópico mediante técnicas neuronal-difusas y redes de Petri.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:  
Maestro en ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

Ing. Edgar Francisco Duarte Ruiz

Dirigido por:

Dr. René de Jesús Romero Troncoso  
Dr. Luis Morales Velázquez

San Juan del Río, Qro. Agosto de 2011



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

Controlador híbrido de iluminación aplicado a un fitotrópico mediante técnicas  
neuronal-difusas y redes de petri

### TESIS

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

**Presenta:**  
Ing. Edgar Francisco Duarte Ruiz

**Dirigido por:**  
Dr. René de Jesús Romero Troncoso

### SINODALES

Dr. René de Jesús Romero Troncoso  
Presidente

Firma

Firma

Firma

Dr. Luis Morales Velázquez  
Secretario

Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos  
Vocal

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González  
Suplente

Firma

Dr. Ramón Gerardo Guevara González  
Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Agosto de 2011  
México

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un control de iluminación en un fitotrópico utilizando leyes de control clásicas, así como técnicas de control inteligente como lógica difusa, redes de petri y redes neuronales implementadas en FPGA, se muestran los pasos a seguir para instrumentar el fitotrópico, así como para lograr la implementación en hardware de las diferentes técnicas de control mencionadas y en este sentido obtener el control de una de las variables como es la iluminación con diferentes técnicas de control. Además se muestra como se realizó la sintonización del sistema de control para cada una de las técnicas mencionadas. El sistema se prueba en un fitotrópico desarrollado en la Universidad Autónoma de Querétaro. Después se muestran los resultados obtenidos del comportamiento del sistema de iluminación al utilizar técnicas de control ya mencionadas fijando como referencia niveles de iluminación diferentes.

**(Palabras clave:** Fitotrópico, iluminación, control PI, lógica difusa, redes neuronales, redes de petri, FPGA)

## **SUMMARY**

This work develops a control of light in a phytotron using classical control laws, as well as intelligent control techniques such as fuzzy logic, Petri nets and neural networks implemented in FPGA. It shows the steps for implementing the phytotron, and to achieve hardware implementation of different control techniques mentioned above and thereby gain control of the variables such as lighting control with different techniques. The system was tested in a phytotron developed at the Universidad Autónoma de Querétaro. Following are the results obtained by reference to different levels of illumination.

(**Keywords:** Phytotron, lighting, PI control, fuzzy logic, neural networks, Petri nets, FPGA)

## **DEDICATORIAS**

A mi familia que siempre me apoyaron para seguir con mis estudios y me alentaron en los momentos difíciles para seguir con mi investigación. Además, por haberme proporcionado los recursos para poder asistir a la universidad ya que sin su apoyo no sería posible haber llegado hasta esta instancia de mi vida profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la facultad de ingeniería campus San Juan del Río que me permitió realizar mis experimentos dentro del laboratorio y por haberme proporcionado el material que necesite para la realización de los experimentos.

A mis compañeros de posgrado que me brindaron su amistad durante estos 2 años en que estuve en la universidad y me hicieron pasar momentos divertidos en donde me pude olvidar un poco de la vida profesional.

Al grupo de investigación que cuando surgían algunos problemas con los controladores me apoyaron para poder resolverlos.

A mis profesores que me proporcionaron sus conocimientos los cuales me servirán en mi vida profesional para ser una persona exitosa.

## ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN .....</b>	<i>i</i>
<b>SUMMARY.....</b>	<i>ii</i>
<b>DEDICATORIAS.....</b>	<i>iii</i>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<i>iv</i>
<b>ÍNDICE .....</b>	<i>v</i>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<i>viii</i>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<i>ix</i>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivo general .....	8
1.2.2 Objetivos particulares .....	8
1.3 Justificación .....	9
1.4 Planteamiento general .....	10
<b>2. REVISIÓN DE LITARATURA .....</b>	<b>12</b>
2.1 Fitotrópico .....	12
2.2 La radiación solar .....	12
2.2.1 Intensidad de iluminación. ....	13
2.2.2 Naturaleza de las radiaciones luminosas.....	14
2.3 Redes neuronales artificiales .....	15
2.3.1 Modelos de la Unidad de Procesamiento Elemental.....	18
2.3.2 Retropropagación. ....	19
2.3.3 Función de activación .....	23
2.4 Lógica difusa .....	27

2.4.1	Conjuntos difusos .....	29
2.4.2	Defusificación.....	35
2.4.2.1	Método de centro de área .....	36
2.4.2.2	Método de centro nivelado de área.....	36
2.4.2.3	Método de primer máximo.....	36
2.4.2.4	Método de criterio de Max .....	36
2.4.2.5	Método de máximo promedio .....	37
<b>2.5</b>	<b>Redes neuro-difusas.....</b>	<b>37</b>
2.5.1	Características de las redes neuronales-difusas .....	38
<b>2.6</b>	<b>Redes de Petri .....</b>	<b>39</b>
2.6.1	Significado de las componentes de una Red de Petri.....	40
2.6.2	Sensibilización de una transición .....	41
2.6.3	Evolución del marcado.....	42
2.6.4	Características de una Red de Petri .....	42
2.6.5	Vivacidad .....	44
2.6.6	Transición viva .....	44
2.6.7	Red viva .....	44
2.6.8	Red parcialmente viva .....	45
2.6.9	Red no viva .....	46
2.6.10	Red Pura .....	47
2.6.11	Red binaria.....	47
2.6.12	Red no binaria.....	48
2.6.13	Red de Petri limitada.....	49
2.6.14	Red ordinaria .....	50
2.6.15	Red de Petri generalizada .....	50
2.6.16	Redes de Petri coloreadas.....	50
2.6.17	Redes de Petri temporizadas.....	51
2.6.18	Conflicto estructural .....	51
2.6.19	Conflicto efectivo.....	51
2.6.20	Exclusión mutua.....	52

<b>2.7 Fotorresistencias (LDR) .....</b>	<b>53</b>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 Instrumentación de fitotrópico .....</b>	<b>56</b>
3.1.1 Distribución de lámparas .....	56
3.1.2 Colocación de sensor de iluminación.....	57
3.1.3 Tarjeta de potencia .....	58
3.1.4 Tarjeta de sensores .....	59
3.1.5 Tarjeta de desarrollo FPGA .....	60
<b>3.2 Linealización del sensor.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3 Sintonización de planta de sistema.....</b>	<b>62</b>
<b>3.4 Control Difuso .....</b>	<b>63</b>
3.4.1 Fusificación.....	63
3.4.2 Etapa de inferencia.....	66
3.4.3 Defusificación.....	67
3.4.4 Sintonización de control difuso .....	69
<b>3.5 Redes neuronales .....</b>	<b>71</b>
3.5.1 Diagrama general de red neuronal .....	71
3.5.2 Función de excitación .....	72
3.5.3 Estructura general de red neuronal.....	72
3.5.4 Entrenamiento de red neuronal.....	73
<b>3.6 Red de Petri. ....</b>	<b>75</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>79</b>
<b>6. REFERENCIAS .....</b>	<b>80</b>
<b>Apéndice A.....</b>	<b>83</b>
<b>Artículo publicado en congreso.....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
3.1. Base de reglas .....	66
3.2. Pesos de red neuronal .....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Diagrama a bloques de sistema de iluminación .....	11
2.1 Primer modelo de neurona artificial. Nguyen et al. (2003) .....	17
2.2. Neurona artificial con activación como peso. Nguyen et al. (2003) .....	18
2.3. Esquema de una neurona artificial. McCulloch et al.(1943) .....	18
2.4. Red de retropropagación. Aguado(2000) .....	20
2.5. Red neuronal simplificada. Aguado (2000).....	21
2.6. Función lineal. Flórez et al. (2008) .....	24
2.7. Función escalón. Flórez et al. (2008) .....	24
2.8. Función mixta. Flórez et al. (2008) .....	25
2.9. Función sigmoide. Flórez et al. (2008) .....	26
2.10. Función tangente hiperbólica. Flórez et al. (2008) .....	26
2.11. Función gaussiana. Flórez et al. (2008) .....	26
2.12. Función sinusoidal. Flórez et al. (2008).....	27
2.13 Sistema basado en Lógica Difusa ( <i>FLS</i> ). Martín (2008).....	28
2.14 Triangular. Nguyen et al. (2003).....	30
2.15.Trapezoidal. Nguyen et al. (2003) .....	30
2.16 Triangular. Nguyen et al. (2003).....	31
2.17. Trapezoidal. Nguyen et al. (2003) .....	31
2.18. Gráfica de conjuntos difusos. Nguyen et al. (2003).....	32
2.19. Gaussiana e- $x^2$ .Nguyen et al. (2003) .....	32
2.20. Gaussiana e-( $x-5)^2$ . Nguyen et al. (2003) .....	32
2.21 Curva de campana generalizada. Nguyen et al. (2003) .....	33
2.22. Función S $1 + e^{-x} + 1$ . Nguyen et al. (2003).....	34
2.23. Función Z $1 + e^{x-1}$ . Nguyen et al. (2003) .....	34
2.24. Función sigmoide incremental $1 + \tanh x$ . Nguyen et al. (2003).....	34
2.25. Función sigmoide decremental $1 - \tanh x$ . Nguyen et al. (2003).....	35
2.26. Productos de funciones sigmoides $1 - \tanh^2 x$ . Nguyen et al. (2003) .....	35

2.27. Representación de los diferentes elementos de una Red de Petri. García (2004) .....	40
2.28 Conexiones válidas y no válidas entre lugares y transiciones. García (2004) .....	40
2.29. Equivalente AND de la sensibilización de una transición. Martínez (2006) .....	42
2.30. Evolución del marcado. Martínez (2006) .....	42
2.31. Red viva. Martínez (2006) .....	45
2.32. Red parcialmente viva. Martínez (2006) .....	46
2.33. Red no viva. Martínez (2006) .....	46
2.34. Red Ordinaria y Pura. Martínez (2006) .....	47
2.35. Red Binaria. Martínez (2006) .....	48
2.36. Red no Binaria. Martínez (2006) .....	48
2.37. Red 3-limitada. Martínez (2006) .....	49
2.38. Conflicto estructural. Martínez (2006) .....	51
2.39. Conflicto efectivo. Martínez (2006) .....	52
2.40. Exclusión mutua. Martínez (2006) .....	53
2.41. Fotorresistencia (LDR). A) Símbolo. b) Modelo de bajo costo encapsulado en plástico transparente. Pallás (2003) .....	53
3.1. Fitotrón .....	55
3.2. Distribución de lámparas .....	56
3.3. Distribución de lámparas dentro de fitotrón .....	57
3.4. Distribución de sensor de iluminación dentro del fitotrón .....	57
3.5. Diseño PCB de tarjeta de potencia .....	58
3.6. Tarjeta de potencia .....	58
3.7. Diseño PCB de tarjeta de sensor .....	59
3.8. Tarjeta de sensores .....	59
3.9. Tarjeta de desarrollo FPGA .....	60
3.10. Gráfica de respuesta de sensores .....	61
3.11. Gráfica de respuesta lineal de sensores .....	62
3.12. Respuesta de sistema de iluminación sin control .....	63
3.13. Funciones de pertenencia para entrada 1 .....	64
3.14. Funciones de pertenencia para entrada 2 .....	64

3.15. Funciones de pertenencia para la salida.....	64
3.16. Estructura digital de función triangular. ....	65
3.17. Estructura digital de evaluación de funciones de pertenencia.....	66
3.18. Esquema de evaluación de reglas .....	67
3.19. Estructura digital utilizada para obtener el numerador de la función de salida.	
.....	68
3.20. Estructura digital utilizada para obtener el denominador de la función de salida.....	69
3.21. Bloque de obtención de resultado final de defusificación. ....	69
3.22. Sintonización de control difuso.....	70
3.23. Diagrama de la red neuronal utilizada como control del sistema. ....	71
3.24. Estructura de función de excitación de la red neuronal. ....	72
3.25. Estructura general de la red neuronal utilizada como control del sistema de iluminación. ....	73
3.26. Gráfica de entrenamiento de la red neuronal. ....	74
3.27. Diagrama general de la red de petri. ....	75
4.1. Respuesta del sistema de control PI-RdP ante diferentes referencias.....	76
4.2. Respuesta del sistema de control difuso-RdP con diferentes referencias.....	77
4.3. Respuesta del sistema de control de redes neuronales en conjunto con una red de petri. ....	78

## INTRODUCCIÓN

---

En la actualidad es importante que las plantas se desarrollen en un menor tiempo para satisfacer las necesidades de la sociedad ya que si no se da abasto con la producción del país, se recurre a la importación de vegetales para la alimentación de la sociedad mexicana, por esta razón se han implementado estructuras en donde se cultivan plantas con ambientes controlados, esto para tener una eficiencia mayor en el crecimiento de los vegetales. Al reducir el tiempo de reproducción de los vegetales se tiene una mayor producción de ellos en menor tiempo comparado con el cultivo que depende del medio ambiente para desarrollarse. Aunado a los factores naturales que a veces afectan hectáreas de cultivo causado por inundaciones y al existir escases de agua no se pueden desarrollar los cultivos. Por esta razón, en esta investigación se tratará con una de las variables que influyen en el crecimiento de plantas como es el caso de la iluminación que es importante para llevar a cabo la fotosíntesis de las plantas.

En el presente trabajo se implementarán diferentes sistemas de control como el caso de un control *PI*, redes neuronales, control difuso y redes de Petri. Estos controladores se implementarán mediante el uso del *VHDL* (*VHSIC: hardware description language*; *VHSIC: very-high-speed hardware integrated circuit*) el cual se sintetizará en un *FPGA* (Field Programmable Gate Array, *Arreglo de Compuertas Programables en campo*). Se evaluará la respuesta del sistema de iluminación con los diferentes controladores propuestos y mediante los resultados se elegirá el control que tenga una mejor respuesta para ser utilizado en el sistema de iluminación ya que la importancia de este proyecto es obtener un sistema de iluminación que ayude al desarrollo de las plantas.

En el capítulo 1 se presenta la introducción de este trabajo donde se describen los objetivos, antecedentes y justificación de la investigación. Además, se muestra a través de un diagrama a bloques el planteamiento general de esta tesis. En el capítulo 2 se presentan conceptos básicos para poder realizar una

investigación adecuada. Se mencionan las características de un fitotrópico, luego se muestran las redes neuronales y sus características para realizar un buen diseño del controlador. Después, se muestran las redes de Petri así como los diferentes tipos de ellas y se mencionan sus características más importantes con la finalidad de entender mejor su comportamiento y así diseñar el controlador correspondiente a esta técnica de control. Por último se describe el sensor de iluminación. El capítulo 3 describe como se desarrolló esta investigación. Se muestran imágenes de las tarjetas electrónicas que se utilizaron para la etapa de potencia y de control del sistema de iluminación. Se muestran los bloques que conforman los diferentes controladores que se utilizaron para el desarrollo de esta investigación. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos del trabajo y el análisis de ellos. Además, se grafica la respuesta obtenida en cada controlador utilizado en este proyecto. En el capítulo 5 se dan las conclusiones obtenidas de la presente investigación. Por último se incluye una sección de referencias en las que se fundamentó esta tesis.

## **1.1 Antecedentes**

La producción de plantas de cultivo es importante para la sociedad ya que contienen vitaminas que son importantes para la salud del cuerpo humano, por esta razón al tener una mayor producción de ellas satisface las necesidades de la sociedad; además, las plantas que se cultivan en ambientes controlados son de mejor calidad beneficiando la exportación de ellas mejorando la economía del país. Por esta razón, los ambientes en donde se cultivan las plantas deben ser controlados con precisión para que sea más eficiente el proceso de cultivo y de una mayor calidad.

En el área local como es el caso de la Universidad Autónoma de Querétaro, se han desarrollado investigaciones en el monitoreo de invernaderos como es el caso de Rojas (2003) quien desarrolló un control difuso para el sistema de riego de un invernadero, en donde se monitoreaba la temperatura y humedad para determinar cuando era necesario suministrar agua a las plantas, esto para tener un manejo óptimo del agua de riego, evitando la pérdida de solución nutritiva, además para mejorar el crecimiento de las plantas y así, incrementar la producción de ellas. Además, García (2004) desarrolló un control del clima de invernaderos realizando mediciones de la presión de vapor, la tasa de crecimiento del cultivo, el contenido de materia seca, la radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento para a partir de las mediciones obtenidas encontrar una ecuación que relacione todas estas variables con el crecimiento del cultivo. Mediante el uso de procesamiento de imágenes se obtenía el crecimiento de la planta cultivada y se relacionaba con las condiciones ambientales para verificar la ecuación obtenida del crecimiento de la planta para que se use en un sistema de control para mejorar la fotosíntesis de las plantas.

Siguiendo la línea de investigación en invernaderos, Gómez (2005) desarrolló un control difuso-PID para un sistema de riego en un invernadero en donde se controlaba el nivel de nutrientes que recibían las plantas realizando mediciones de pH y conductividad eléctrica para determinar el nivel de nutrientes que se proporcionan a las plantas de cultivo. También, Rojano (2006) realizó una

identificación experimental del clima en un invernadero, la identificación la realizó mediante el método de mínimos cuadrados, las variables que estimó fueron: la temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Realizó experimentos con 1, 2, 3 y 4 entradas las cuales correspondían a las variables mencionadas, la estimación se realizaba en un periodo de 24 horas y las entradas obtenidas en un día del experimento se utilizaban como entradas para el siguiente día de experimentación para obtener las salidas estimadas, esto sirvió para encontrar un modelo lineal para estimar la temperatura y humedad del invernadero.

Toledano (2006) desarrolló un sistema de monitoreo remoto para invernadero en donde se monitorea la temperatura exterior e interior, y la humedad exterior e interior del invernadero a través de la red inalámbrica en donde se grafican los datos obtenidos para observar el comportamiento de las variables medidas las cuales se pueden consultar en una página web, esto con la finalidad de estar observando el comportamiento de la temperatura y humedad a gran distancia y no tener que estar cerca del invernadero para conocer el comportamiento de estas variables.

En el área nacional se han desarrollado investigaciones en lógica difusa como es el caso de Ley et al. (2000) quienes desarrollaron un control de voltaje para sistemas de potencia, este sistema de control se basó en lógica difusa el cual especificaba los cambios de voltaje de generación, las pruebas las realizaron utilizando un sistema de nueve nodos del *IEEE*.

En el ámbito internacional haciendo referencia al dispositivo en donde se implementará el sistema de control de iluminación. Se han realizado sistemas de control usando un *FPGA* para implementar el sistema de control, este es el caso de El-Medany (2008) quien implementó un sistema de sensado para humedad y temperatura haciendo uso de *VHDL* en la descripción del circuito para que el costo del sistema de control sea bajo. Este sistema de control se realizó para estar monitoreando la humedad y temperatura en tiempo real usando mensajes *SMS* (*Short Messaging Service*).

Por otra parte, se han desarrollado investigaciones en controladores híbridos como es el caso de Zengqi et al. (1996) quienes desarrollaron una red neuro-difusa. Esta red estaba compuesta de dos partes: una red antecedente y una red consecuente. La red actuaba como un controlador lógico difuso. La red antecedente definía las reglas difusas y la red consecuente implementaba las consecuencias de las reglas. Realizaron un mapeo de una función no lineal y se obtuvieron buenos resultados de la red neuronal-difusa. También, Erenoglu et al. (2006) desarrollaron un control inteligente en donde usaron un *PID* y un *Fuzzy*, además, realizaron un híbrido entre estos dos controladores, solamente realizaron la simulación para conocer el comportamiento de los tres controladores ante una entrada escalón y observaron que el control híbrido tenía un mejor comportamiento en estado estable y transitorio comparado con el control *Fuzzy* y *PID*.

En la misma área internacional, se han desarrollado controles de iluminación como es el caso de Yoshito et al. (1998) quienes realizaron un estudio sobre el control de luz en lámparas fluorescentes con interferencia difusa ya que se han diseñado varios sistemas de control de luz para ahorro de energía pero la iluminación no es muy confortable, entonces, este estudio sirvió para que mediante la interferencia difusa en el control de la luz se tuvieran ambas cosa, el ahorro de energía y una iluminación confortable. También encontraron que la modulación de luz mejoró usando las reglas difusas y un filtro pasa bajas. También, Sulaiman et al. (2006) desarrollaron un sistema de control basado en lógica difusa para mejorar la eficiencia de la iluminación y así disminuir el consumo de energía necesaria para iluminar una habitación. Para esto implementaron el control difuso en un *PIC* y al estar comunicado con un software, se controlaba la iluminación para que fuera constante.

Por el mismo camino, Fan et al. (2008) realizaron un control difuso basado en redes neuronales, este control se utilizó para cambiar el tiempo en que las luces de un semáforo estaban activadas dependiendo de las condiciones del tráfico, si era necesario que la luz verde permaneciera más tiempo activada para

disminuir el tráfico en ese sentido, el sistema de control detectaba esa necesidad y cambiaba la fase, es decir, el tiempo en que se encontraba activada la luz verde. Esto fue realizado para conocer la demanda de tener sistemas controlados en tiempo real y también para disminuir el daño de los automóviles debido al tiempo en que se encuentran detenidos por el tráfico.

También, se han desarrollado investigaciones sobre la importancia de la iluminación en el desarrollo de plantas como es el caso de García et al. (2007) quienes realizaron un estudio sobre la influencia de las condiciones de iluminación en la germinación de embriones somáticos. Usaron embriones somáticos maduros los cuales fueron colocados en cámaras de crecimiento con iluminación solar y artificial. Durante un periodo de 15 días dejaron los embriones expuestos a la luz y después de este periodo se evaluaron el número de embriones germinados con plúmula clorofílica expuesta y la formación de plantas completas. Esto se realizó para conocer los efectos de la luz en el desarrollo de las plantas.

En la parte internacional referente a invernaderos se han desarrollado varios trabajos uno de ellos es Boaventura et al. (2000) quienes proponen la estimación de parámetros en tiempo real para un modelo lineal. La investigación se realiza en un invernadero para fines experimentales, donde el objetivo es calcular los parámetros de la estructura de un modelo de caja negra en línea para estimar la temperatura dentro del invernadero. Los resultados obtenidos muestran que un modelo de segundo orden en identificación en línea alcanza aproximaciones deseadas. Las variables consideradas como entradas al sistema son: temperatura del aire y suelo, radiación solar, humedad relativa y velocidad del aire, todas estas variables medidas en el exterior del invernadero. Además, Arvanitis et al. (2000) consideran un sistema para ejercer acciones de calentamiento. El sistema está enfocado a estimar un balance de energía, considerando la capacidad térmica del invernadero y un factor de pérdida de calor. Para lo anterior se requiere encontrar valores de algunos coeficientes de forma experimental; ubicándose éstos en funciones con relación directa a la temperatura en el interior del invernadero. La investigación plantea de forma general una

propuesta donde se deduce un modelo analítico considerando los factores físicos más significativos a fin de lograr minimizar el error entre lo calculado por el modelo y los valores reales.

Por otra parte, Pasgianos et al. (2003) desarrollaron un sistema desacoplado para temperatura y humedad. Considera que al ser lineal el modelo del sistema, permitirá una mayor facilidad de aplicación y suficiente aproximación a datos experimentales. Apoyados en una carta psicométrica y referenciados en leyes físicas, será posible determinar los tiempos correctos de activación del equipamiento presente dentro del invernadero para corregir situaciones críticas. El modelo es capaz de estimar los tiempos requeridos por el equipamiento para llegar a puntos de regulación propuestos. El desacoplamiento es realizado para la temperatura y humedad relativa, las cuales se consideran como entradas manipulables a un calentador y un sistema de nebulización respectivamente. Cada una de las variables es determinada por una ecuación. La primera ecuación estima la temperatura en el interior del invernadero, tomando en cuenta la humedad relativa interior. Y la segunda ecuación estima la humedad relativa interior, considerando la temperatura en el interior del invernadero.

Por otro lado, se han desarrollado investigaciones sobre sistemas de control de iluminación en invernaderos como es el caso de Kuo et al. (2009) quienes desarrollaron un control inteligente de luz para ser utilizado en invernaderos. Este control está basado en lógica difusa, el objetivo del control era regular, de forma automática, la luz solar de manera eficiente y así mejorar la calidad de la iluminación interior, reduciendo la necesidad de luz artificial.

En el ámbito de la automatización de un fitotrópico. Benítez et al. (1998) automatizaron tres fitotrones utilizando un *PLC* para regular los parámetros de iluminación, temperatura, humedad y riego, la iluminación sólo tenía doce niveles diferentes de iluminación. Esto se desarrolló para disminuir el costo energético que requería el fitotrópico antes de ser automatizado.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

- Implementar un controlador híbrido para proporcionar con precisión los niveles de iluminación requeridos en un fitotrópico mediante el uso de técnicas de control clásico, redes neuronales, lógica difusa y redes de Petri.

### **1.2.2 Objetivos particulares**

- Instrumentar un fitotrópico realizando una selección de equipo para posteriormente implementar un sistema de control de iluminación con diferentes técnicas.
- Comparar el nivel de iluminación obtenido mediante el uso de un controlador difuso, redes neuronales y control clásico para conocer cuál tiene un mejor desempeño.
- Implementar un controlador híbrido utilizando redes de Petri para controlar lámparas on-off y para lámparas atenuables mediante técnicas de control clásico, redes neuronales y lógica difusa.

### **1.3 Justificación**

Debido a que la iluminación es muy importante para que las plantas crezcan adecuadamente, es conveniente que la iluminación que se tiene dentro del fitotrófico, sea la adecuada para que el proceso de la fotosíntesis se desarrolle eficientemente lo cual reduce el tiempo necesario para que un tipo de planta esté listo para ser comercializada y esto incrementa los ingresos de la persona que la está cultivando lo que reduce el costo final de cada planta ya que se puede realizar una mayor producción de plantas con el mismo costo comparado si la iluminación no fuera eficiente.

Si el nivel de iluminación varía un poco, se afecta el proceso de crecimiento de la planta. De esta manera, al estar variando la intensidad luminosa de las lámparas, su tiempo de vida se reduce, por lo que ocasionaría costos mayores al tener que reemplazar las lámparas en un periodo más corto. También, al no crecer las plantas en el tiempo esperado, ocasiona más gastos debido a que se deben invertir más recursos una determinada cantidad de plantas.

Por otra parte al ser eficiente el sistema de control de iluminación, el consumo de energía se reduce lo que beneficia la economía de la persona que cultiva la planta, además, de que beneficia al medio ambiente al reducir el consumo de energía eléctrica lo que implica que se aprovechen mejor los recursos usados para la generación de la misma.

## 1.4 Planteamiento general

La iluminación es muy importante para que las plantas realicen una fotosíntesis adecuada, por lo que el sistema de control de la iluminación en un fitotrópico debe ser lo más exacto posible, por esto se utilizarán en esta investigación técnicas de control de redes neuronales, lógica difusa, clásico (*P/I*) y redes de Petri. Utilizando estas técnicas de control se implementará un control híbrido para reducir los errores que se tengan en la iluminación del fitotrópico. Por otra parte existen diferentes factores que afectan el comportamiento del sistema de control de iluminación, y al usar diferentes técnicas de control se mejorará ese comportamiento haciendo más eficiente el sistema de iluminación.

Por otra parte, como se va a regular la iluminación, es necesario utilizar lámparas en donde se pueda regular su intensidad por lo que se utilizarán lámparas incandescentes. Pero si se usan sólo este tipo de lámparas, la eficiencia de la iluminación no será la adecuada ya que una gran cantidad de la energía utilizada por la lámpara se convierte en calor. Por esto se utilizarán lámparas fluorescentes para que la energía suministrada para producir iluminación se utilizada más eficientemente. Por lo anterior se aplicarán redes de Petri para controlar las lámparas fluorescentes. En la Figura 1.1 se muestra un diagrama a bloques en donde se observan los elementos del sistema de iluminación. Se observa que en el *FPGA* se encuentran los diferentes controladores propuestos para esta investigación los cuales regulan un *PWM* que al usar una etapa de potencia se regula la intensidad de las lámparas incandescentes y se activa el sistema ON-OFF de las lámparas fluorescentes. Además, se graficarán las respuestas del sistema obtenidas con los diferentes controladores. También se muestra el sensor de iluminación el cual nos proporciona una relación de la intensidad de iluminación y los parámetros que utiliza el sistema de control.

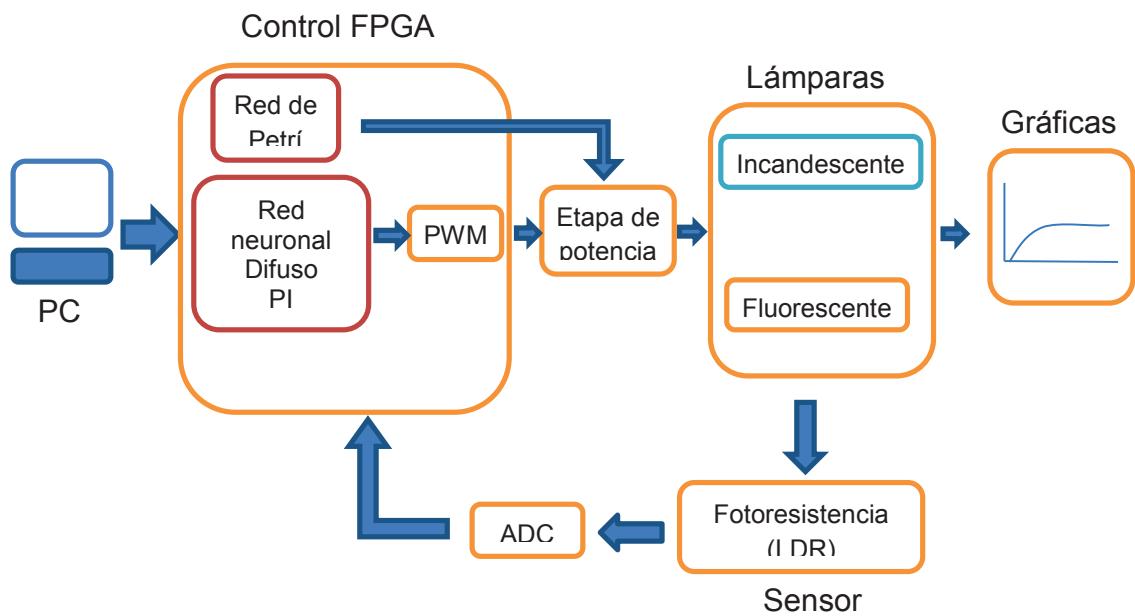


Figura 1.1 Diagrama a bloques de sistema de iluminación

## REVISIÓN DE LITARATURA

---

### 2.1 Fitotrón.

Maroto (2008) dice que son recintos fabricados por el hombre en los que se regulan los principales factores climáticos, como temperatura, humedad relativa, iluminación, contenido en CO<sub>2</sub>, etc.

Estos equipos tienen un valor incalculable en la investigación agronómica, puesto que permiten simular condiciones climáticas distintas, de manera que cuando se trabaja con varios fitotrones a la vez, pueden llevarse a cabo simultáneamente una investigación en una determinada dirección, empleando condiciones dinámicas diferentes, con todas las ventajas que esto supone de cara a conseguir resultados mucho más anticipadamente y con mucho mayor rigor que si hubiera que esperar a las condiciones naturales.

En algunas ocasiones estos fitotrones de climatología regulable también se emplean con fines comerciales, como en algunos procesos de multiplicación, enraizamiento, cultivo, etc.

### 2.2 La radiación solar

García (2004) menciona que la luz (densidad de flujo de fotones fotosintéticos. *PPFD: photon flux density*) es el factor más importante para la producción de plantas en ambientes controlados. La disminución del *PPFD* y de la duración de la luz en conjunto con los cambios estacionales reduce el rendimiento de frutos en la producción de plantas. Esta densidad de flujo es medida en el rango de longitudes de onda de la luz entre 400 y 700 nm y se le llama, radiación fotosintéticamente activa (*PAR: photosynthetically active radiation*) y es el tipo de radiación más eficiente en cuanto al cultivo. Otros tipos de radiaciones, comprendidos en longitudes de onda inferiores o superiores a la comprendida por la radiación *PAR*, no contribuyen directamente al proceso fotosintético, sin embargo, intervienen en otros procesos tales como la transpiración y el calentamiento, tanto del ambiente controlado como del cultivo.

La calidad de luz ejerce diversos efectos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas a través del proceso de fotomorfogénesis. En general, la mayoría de los procesos fotomorfológicos son controlados mediante las longitudes de onda que se encuentran en las regiones del azul (B:400-500 nm), rojo (R:600-700 nm) y rojo lejano (FR:700-800 nm). Durante la fotomorfogénesis, los fotones en dichas regiones son captados por fotoreceptores biológicos presentes en las plantas. Los procesos fotomorfológicos no están influenciados por la intensidad de los fotones. El fitocromo es el más estudiado de los fotoreceptores. El fitocromo puede absorber longitudes de onda desde 300 nm a los 800 nm con una absorción máxima en la región R (600-700 nm) con un pico a los 660 nm y en la región FR (700-800 nm) con un pico a los 730 nm del espectro de radiación.

### 2.2.1 Intensidad de iluminación.

Urbano (1992) dice que en atmósferas en donde hay ausencia de nubes, la intensidad luminosa es sensiblemente proporcional a la intensidad de la radiación solar. En ensayos realizados en donde se mantenía constante la temperatura y el contenido carbónico de la atmósfera, se observa que si la planta está sometida a baja intensidad luminosa, cualquier incremento de iluminación origina un aumento de la actividad fotosintética y en la formación de sustancias orgánicas por la planta.

Es frecuente hablar de plantas de sol (heliofilas) y plantas de sombra o de umbría, para relacionar la respuesta de los vegetales ante la intensidad luminosa. Las primeras requieren fuertes insolaciones y son capaces de aprovechar intensidades luminosas importantes, ya que su nivel de saturación lumínica es alto. Las especies de umbría aprovechan peor la intensidad luminosa, ya que se saturan antes de luz y su actividad fotosintética es más baja.

Debido a la pobreza de la atmósfera en CO<sub>2</sub>, las plantas no pueden aprovechar altas intensidades luminosas y esto limita la fotosíntesis. De acuerdo a esto se pueden establecer beneficios de altos niveles de iluminación al igual que sus contras a falta de la iluminación.

Cuando se tienen altos niveles de iluminación:

- Favorece el ahijamiento, la floración y la fructificación.
- Intensifica la producción de pigmentos.
- Incrementa la actividad fotosintética.
- Intensifica el olor y el sabor de los vegetales.
- Favorece la lignificación y proporciona resistencia al encamado.
- Disminuye el crecimiento en altura.
- Aumenta la resistencia de las plantas al ataque de insectos y de criptogamas

Cuando se tienen bajos niveles de iluminación:

- Producen color verde claro en la vegetación y reducida formación de pigmento.
- Favorece el crecimiento en altura y la elongación del tallo.
- Inducen el encamado.
- Reducen la formación de sustancias orgánicas.
- Estimulan la formación de raíces y tubérculos.
- Aumentan la sensibilidad a plagas y enfermedades.

### 2.2.2 Naturaleza de las radiaciones luminosas.

Urbano (1992) Aunque la radiación solar lleva las radiaciones químicas, luminosas y térmicas, es útil considerar aisladamente el efecto de las distintas radiaciones originadas por los diferentes focos radiantes utilizados en cultivos con iluminación artificial. Las radiaciones de longitud de onda muy corta (ultravioletas), emitidas por lámparas de vapor de mercurio pueden ser estimulantes de la germinación, pero solamente cuando se utilizan a baja intensidad y durante poco tiempo. Su influencia es mala en dosis largas, ya que provocan quemaduras y necrosis en los tejidos vegetales. Aunque las luces de longitud de onda inferior a  $.5\mu\text{m}$  (azul, añil y violeta) pueden producir fotosíntesis, siempre que tengan un tiempo prolongado de actuación, son incapaces de garantizar la alimentación de la

planta y provocan su ahilamiento. Se sabe que la actividad fotosintética tiene un máximo de absorción en la banda del azul y otro en la del rojo. Sin embargo, la ausencia de luces de longitud de onda larga produce fotosíntesis deficientes. En horticultura, la iluminación artificial está asegurada ya sea por tubos de neón y lámparas incandescentes, los cuales tienen radiaciones anaranjada y roja, o por la luz blanca de los tubos fluorescentes.

### 2.3 Redes neuronales artificiales

Nguyen et al. (2003) dicen que las redes neuronales artificiales son modelos matemáticos basados en el conocimiento del sistema nervioso biológico. Son como dispositivos de cálculo que pueden aceptar un gran número de entradas y aprender sólo de ejemplos de entrenamiento. Como modelos matemáticos para sistemas nerviosos biológicos, las redes neuronales artificiales son útiles en el establecimiento de las relaciones entre las entradas y salidas de cualquier sistema.

Según Martín (2008). Una red neuronal artificial (*RNA*) es un conjunto de unidades llamadas nodos o neuronas unidas entre sí por medio de conexiones. Cada elemento trabaja sólo con información local y asíncronamente. El conocimiento se almacena en las conexiones o pesos sinápticos. Estos pesos serán ajustados de acuerdo con los patrones de que dispongamos mediante una regla de aprendizaje. A esta parte del proceso en que la *RNA* aprende los patrones se le conoce como entrenamiento. El conocimiento adquirido en esta fase se refleja en unos determinados valores de los pesos sinápticos con los cuales la red debe ser capaz de generalizar, es decir, de dar la salida correcta ante una determinada entrada no vista anteriormente.

Mediante unos patrones de entrenamiento se consigue que la red aprenda, o lo que es lo mismo, que optimice sus conexiones para ser capaz de ofrecer la salida deseada ante una determinada entrada.

La implementación de las redes puede plantearse desde los dos puntos de vista:

*Software*: para aplicaciones sencillas, donde el tiempo de decisión no sea excesivamente elevado.

*Hardware*: para aplicaciones que precisen alta velocidad de decisión.

Las *RNA* son un método de resolver problemas, de forma individual o combinadas con otros métodos, para aquellas tareas de clasificación, identificación, diagnóstico, optimización o predicción en las que el balance datos/conocimiento se inclina hacia los datos y donde adicionalmente, puede haber la necesidad de aprendizaje en tiempo de ejecución y de cierta tolerancia a fallos. En este caso las *RNAs* se adaptan dinámicamente reajustando constantemente los “pesos” de sus interconexiones.

La unidad de una red neuronal artificial es un procesador elemental llamado neurona que posee la capacidad limitada de calcular, en general, una suma ponderada de sus entradas y luego le aplica una función de activación para obtener una señal que será transmitida a la próxima neurona. Estas neuronas artificiales se agrupan en capas o niveles y poseen un alto grado de conectividad entre ellas, conectividad que es ponderada por los pesos. A través de un algoritmo de aprendizaje supervisado o no supervisado, las *RNA* ajustan su arquitectura y parámetros de manera de poder minimizar alguna función de error que indique el grado de ajuste a los datos y la capacidad de generalización de las *RNA*.

Nguyen et al. (2003) dicen que una red neuronal es una colección de neuronas artificiales. Una neurona artificial es un modelo matemático de una neurona biológica en su forma más simple. Las neuronas biológicas son unidades elementales para el proceso de información en un sistema nervioso. El modelo matemático de una neurona artificial está basado en lo siguiente:

- Las neuronas son las unidades elementales en un sistema nervioso en el cual se procesa la información.
- La información entrante está en forma de señales que se transmiten entre las neuronas a través de los enlaces de conexión.

- Cada enlace de conexión tiene un peso propio que multiplica a la señal transmitida.
- Cada neurona tiene una acción interna, en función de un umbral, resultando en una función de activación que se aplica a la suma ponderada de las señales de entrada para producir una señal de salida.

Cuando las señales de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , alcanzan la neurona a través del enlace de conexión con pesos asociados  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , respectivamente, la entrada resultante a la neurona, llamada red de entrada, es la suma ponderada  $\sum_{i=1}^n w_i x_i$ . Si el disparo es  $b$  y la función de activación es  $f$ , entonces la salida de la neurona se define por la ecuación 2.1:

$$y = f(\sum_{i=1}^n w_i x_i - b) \quad (2.1)$$

En el primer modelo computacional para neuronas artificiales, las salidas eran binarias y la función  $f$  era una función escalón definida por la ecuación 2.2:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Así que la activación de esa neurona se muestra en la ecuación 2.3:

$$f(\sum_{i=1}^n w_i x_i - b) = \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^n w_i x_i \geq b \\ 0 & \text{if } \sum_{i=1}^n w_i x_i < b \end{cases} \quad (2.3)$$

Esto se muestra en la Figura 2.1

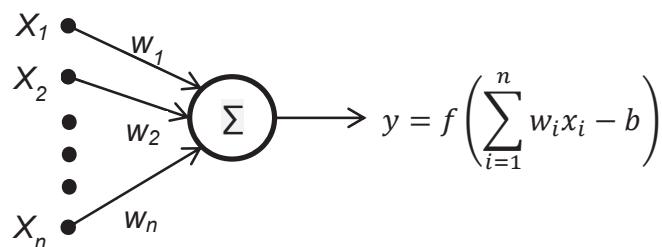


Figura 2.1 Primer modelo de neurona artificial. Nguyen et al. (2003)

Una neurona artificial es caracterizada por los siguientes parámetros. Ecuación 2.4

$$\theta = (w_1, w_2, \dots, w_n, b, f) \quad (2.4)$$

La activación  $b$  puede ser tratada con otro peso agregando un nodo de entrada  $x_0$  que siempre toma el valor de entrada  $x_0=+1$  y colocando  $w_0=-b$  como se observa en la Figura 2.2. Con esta representación, ajustando la activación y los pesos se puede hacer de la misma manera.

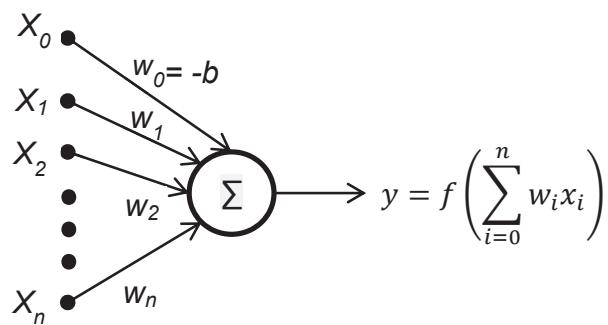


Figura 2.2. Neurona artificial con activación como peso. Nguyen et al. (2003)

### 2.3.1 Modelos de la Unidad de Procesamiento Elemental

McCulloch et al.(1943) concibieron un modelo abstracto y simple de una neurona artificial, este es el elemento básico de procesamiento en una red neuronal artificial. En la Figura 2.3 se muestra su esquema:

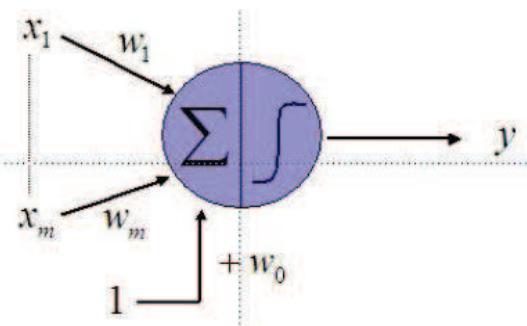


Figura 2.3. Esquema de una neurona artificial. McCulloch et al.(1943)

El modelo está compuesto por un vector de pesos  $w = (w_1, \dots, w_d)^T$  equivalente a las conexiones sináptica en una neurona real,  $w_0$  es el umbral de acción o activación, el vector  $x$  es la entrada y el escalar  $y$  la salida de la unidad. La actividad consiste en generar una única salida  $y$  a partir de la aplicación de la función de activación  $\gamma$  a la suma ponderada entre el valor de entrada  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$  y el vector de pesos  $w = (w_1, \dots, w_d)^T$  más un peso  $w_0$ , obteniéndose la ecuación 2.5

$$y = \gamma(\sum_{i=1}^m w_i x_i + w_0) \quad (2.5)$$

Donde  $\gamma$  es una función no-lineal. La función propuesta por McCulloch-Pitts posee una salida binaria  $\pm 1$  conocida como la función de todo o nada que equivale a la función signo dada por la ecuación 2.6

$$\gamma(z) = sgn(z) = \begin{cases} -1, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Otra función con salida binaria es la función escalón unitario descrita por la ecuación 2.7

$$\gamma(z) = U(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Cuando se consideran neuronas con respuestas de procesamiento gradual, entonces se puede usar funciones de activación de forma lineal  $\gamma(z) = z$  o de forma sigmoidal como la función logística  $\gamma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$  o la tangente hiperbólica  $\gamma(z) = \tanh(z)$ .

### 2.3.2 Retropropagación.

Aguado (2000) dice que existen más de 50 tipos de redes neuronales que han sido estudiadas y usadas en una gran diversidad de aplicaciones. Sin embargo, la más extendida y utilizada para la identificación de procesos dinámicos y su control es la llamada red de retropropagación.

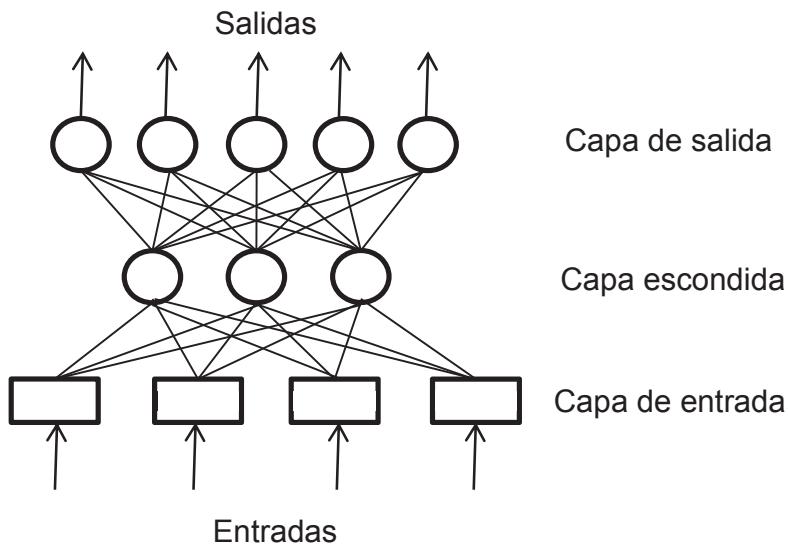


Figura 2.4. Red de retropropagación. Aguado(2000)

Una red de retropropagación típica puede esquematizarse tal como se muestra en la Figura 2.4. El concepto de retropropagación se refiere a un método de entrenamiento de la red y por extensión se le llama “red de retropropagación” a aquella que se entrena mediante dicho método. Algunas de las aplicaciones de este tipo de red son las siguientes:

- Reconocimiento y síntesis de voz
- Reconocimiento de patrones visuales o imágenes
- Análisis de señales de sonar
- Aplicaciones en la defensa
- Diagnóstico médico
- Control de columnas de destilación y otros procesos

La red de retropropagación es un tipo de red neuronal que es capaz de desarrollar una aproximación tan fina como se quiera de cualquier función no-lineal  $y=f(x)$ , a partir de un conjunto de pares de ejemplo  $x, y$ . Las redes multicapa pueden dar resultados que son imposibles de alcanzar con las redes de dos capas. La adición de capas escondidas permite al algoritmo de retropropagación desarrollar una representación interna del problema que puede ser vital para su

solución. La presencia de una o más capas escondidas le da a la retropropagación nuevas dimensiones en términos de su habilidad para aprender la representación de una función arbitraria  $f(x)$ .

Los modelos lineales tradicionales, como el ARX, son equivalentes a un modelo de red neuronal de dos capas con retropropagación. Estos modelos tradicionales están más limitados que un modelo de tres capas con retropropagación en términos de su habilidad para modelar procesos dinámicos. Considerando la red representada en forma simplificada en la Figura 2.5 y se tiene un conjunto de pares de datos,  $x^p, y^p, p=1,2,\dots,N$ .

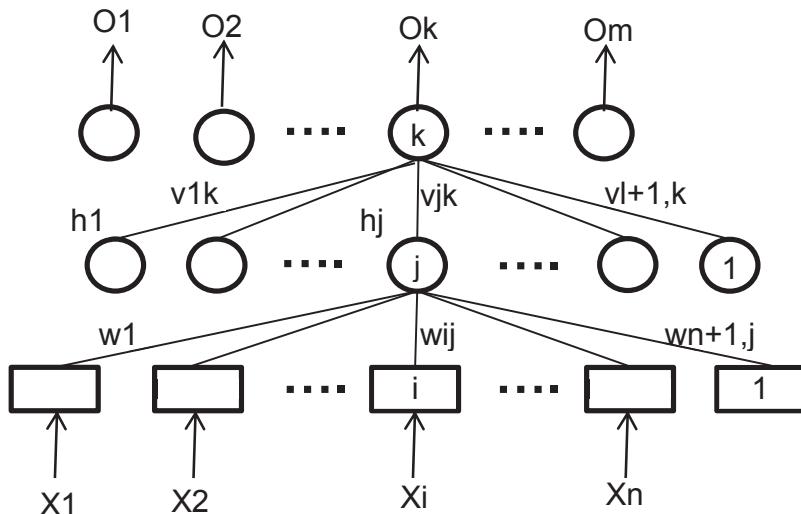


Figura 2.5. Red neuronal simplificada. Aguado (2000)

Para la neurona  $j$  de la capa escondida, se define la función de excitación, correspondiente a la muestra  $p$  de los datos como se muestra en la ecuación 2.8:

$$S_j^p = \sum_{i=1}^n w_{ij}^p x_i^p + w_{n+1,j}^p \quad (2.8)$$

Los datos de entrada y salida  $x_i, y_i$  deben estar normalizados en el intervalo 0-1. Los coeficientes  $w_{ij}, v_{jk}$ , se denominan pesos y a la entrada  $n+1$ , cuyo valor es fijado en 1, se le conoce como **bias**. Este último elemento permite que la red

pueda modelar sistemas en que las salidas pueden tener valores distintos de cero cuando todas las entradas son cero.

La salida de la neurona  $j$  de la capa escondida se calcula generalmente como una función no-lineal de la excitación, aunque en algunos casos puede ser lineal.

La salida de la neurona  $j$  de la capa escondida, se expresa en la ecuación 2.9:

$$h_j^p = f(S_j^p) = \frac{1}{1+\exp(-S_j^p)} \quad (2.9)$$

La excitación de la neurona  $k$  de la capa de salida, se calcula en forma análoga, mediante la ecuación 2.10:

$$r_k^p = \sum_{j=1}^l v_{jk}^p h_j^p + v_{l+1,k}^p \quad (2.10)$$

La salida de la neurona  $k$  de la capa de salida se muestra en la ecuación 2.11:

$$O_k^p = f(r_k^p) = \frac{1}{1+\exp(-r_k^p)} \quad (2.11)$$

El error en la salida  $k$ , para la muestra  $p$  se define en la ecuación 2.12:

$$e_k^p = y_k^p - O_k^p \quad (2.12)$$

Donde  $y_k^p$  es la muestra  $p$  de la salida  $k$ . El criterio a minimizar en la muestra  $p$  se define en la ecuación 2.13:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (e_k^p)^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (y_k^p - O_k^p)^2 \quad (2.13)$$

El proceso de entrenamiento de la red consiste en presentar secuencialmente las entradas  $x_i^p (i = 1, 2, \dots, n), (p = 1, \dots, M)$ , calcular la salida de la red  $O_k^p (i = 1, 2, \dots, m), (p = 1, \dots, M)$ , los errores  $e_k^p$  y el criterio  $E_p$  y aplicar algún procedimiento de minimización de la función  $E_p$  con respecto a los coeficientes de peso  $w_{ij}$  y  $v_{jk}$  de manera que se vayan aproximando a los valores que garantizan un error mínimo entre las salidas de la red  $O_k$  y los datos de salida  $y_k$ . Este

procedimiento se repite tantas veces como sea necesario, es decir, los vectores de datos  $x^p$  e  $y^p$  se utilizan reiteradamente hasta que el error en cada salida  $y$  el criterio  $E_p$ , para  $p=1,2,\dots,N$ , se encuentre por debajo del límite prefijado. Una vez lograda esta condición, se dice que la red está entrenada, lo que significa que será capaz de reproducir la función  $y=f(x)$  con suficiente exactitud si los datos de entrenamiento han sido bien seleccionados y suficientes. A cada ciclo de entrenamiento se le denomina **época**.

Para minimizar el error se utilizan las ecuaciones 2.14 y 2.15 las cuales corresponden al método del **descenso más rápido**.

$$v_{jk}^p = v_{jk}^{p-1} + \eta \delta_k^p h_j^p \quad (2.14)$$

$$w_{ij}^p = w_{ij}^{p-1} + \eta \Delta_j^p x_i^p \quad (2.15)$$

En las que  $\eta$  es una constante que se denomina **coeficiente de aprendizaje**.

Una forma de acelerar la convergencia en el proceso de aprendizaje es incluir un término proporcional al cambio realizado en los coeficientes de peso en la muestra anterior. Se definen las ecuaciones 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19:

$$I_{v_{jk}}^p = \eta \delta_j^{p-1} h_j^{p-1} + \alpha I_{v_{jk}}^{p-1} \quad (2.16)$$

$$I_{w_{ij}}^p = \eta \Delta_j^{p-1} x_j^{p-1} + \alpha I_{w_{ij}}^{p-1} \quad (2.17)$$

$$v_{jk}^p = v_{jk}^{p-1} + \eta \delta_k^p h_j^p + \alpha I_{v_{jk}}^p \quad (2.18)$$

$$w_{ij}^p = w_{ij}^{p-1} + \eta \Delta_j^{p-1} x_j^{p-1} + \alpha I_{w_{ij}}^{p-1} \quad (2.19)$$

Donde el coeficiente  $\alpha$  se denomina *coeficiente de momentum* y sus valores son generalmente menores que los de  $\eta$ .

### 2.3.3 Función de activación

Flórez et al. (2008) mencionan que la función de activación de las neuronas de una red neuronal combina las entradas a una neurona con los estímulos y

pesos recibidos en el estado inicial de la neurona, para producir un nuevo estado de activación de acuerdo con la información obtenida a partir del estado inicial. Se pueden distinguir seis tipos de funciones de activación los cuales son los siguientes:

- La función lineal o identidad: devuelve directamente el valor de activación de la neurona. Este tipo de función se utiliza en redes de baja complejidad, como el modelo Adeline. En la Figura 2.6 se muestra la función lineal.

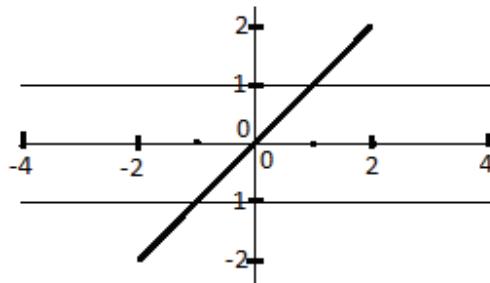


Figura 2.6. Función lineal. Flórez et al. (2008)

- La función escalón o signo: presenta salidas binarias. En este caso, si la activación de la neurona es inferior a un determinado umbral, la salida se relaciona con un valor fijo, y si es igual o superior al umbral se relaciona con otro valor pre-establecido. Este tipo de funciones de activación se utilizan solamente en problemas binarios. Algunas de las redes que utilizan este tipo de función son: el perceptrón simple, la red Hopfield discreta y la neurona clásica de McCulloch-Pitts. En la Figura 2.7 se muestra la función escalón.

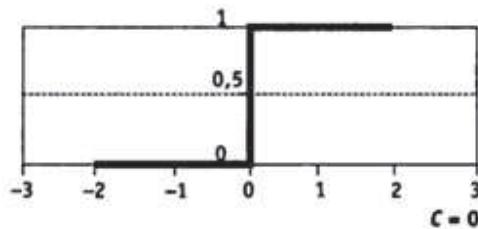


Figura 2.7. Función escalón. Flórez et al. (2008)

- La función mixta o lineal a tramos: en este tipo de función si la activación es menor a un límite inferior pre-establecido, la salida se asocia con un determinado valor; si la activación es igual o superior a un límite superior pre-establecido, la salida se asocia con otro valor. Si el valor de activación se encuentra entre el límite inferior y superior, se utiliza la función lineal para obtener la salida. En la Figura 2.8 se muestra la función mixta.

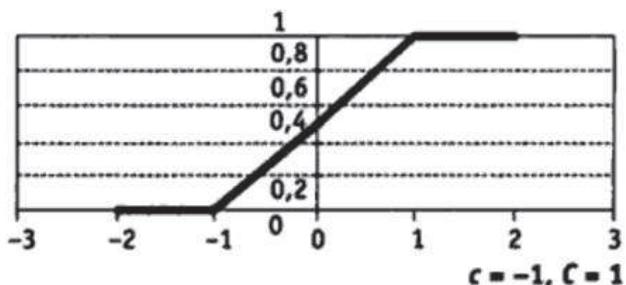


Figura 2.8. Función mixta. Flórez et al. (2008)

- La función sigmoidea: se define en un determinado intervalo con límites superiores e inferiores. Entre las funciones sigmoideas más aplicadas destacan la función sigmoide, la función tangente hiperbólica, y la función sigmoide modificada. Las funciones sigmoideas se caracterizan por presentar una derivada siempre positiva o igual a cero en sus límites asintóticos, que toman su valor máximo cuando  $x=0$ . Así, estas funciones admiten la aplicación de las reglas de aprendizaje típicas de la función escalón, con la ventaja adicional que la derivada se encuentra definida en todo el intervalo, lo que permite emplear algoritmos de entrenamiento más avanzados. En la
- Figura 2.9 se muestra la función sigmoide y en la Figura 2.10 se muestra la función tangente hiperbólica.

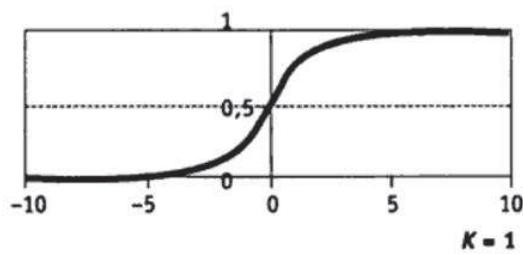


Figura 2.9. Función sigmoide. Flórez et al. (2008)

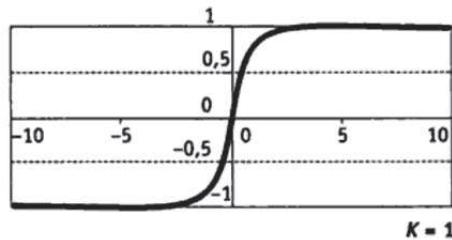


Figura 2.10. Función tangente hiperbólica. Flórez et al. (2008)

- La función gaussiana: adapta la forma de una campana de Gauss, en donde su centro, radio y dirección se pueden adaptar, lo que las hace muy versátiles. Las funciones gaussianas se suelen aplicar en redes complejas con  $m$  capas ocultas que requieren reglas de propagación basadas en el cálculo de distancias cuadráticas entre los vectores de entrada y los pesos de la red. En la Figura 2.11 se muestra la función gaussiana.

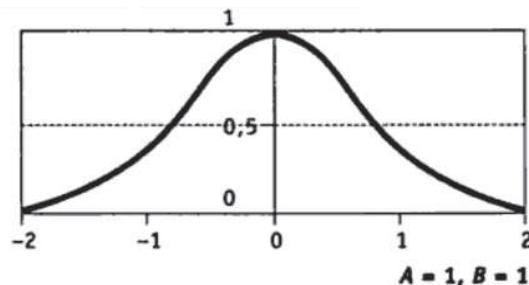


Figura 2.11. Función gaussiana. Flórez et al. (2008)

- La función sinusoidal: genera salidas continuas en el intervalo  $[-1, 1]$ . Estas funciones suelen emplearse en los casos en los que se requiere explícitamente una periodicidad temporal. En la Figura 2.12 se muestra la función sinusoidal.

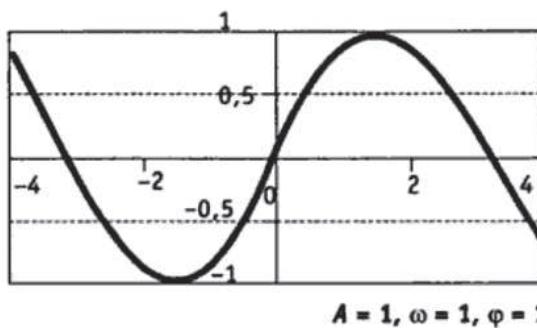


Figura 2.12. Función sinusoidal. Flórez et al. (2008)

## 2.4 Lógica difusa

Martín (2008) indica que un sistema basado en lógica difusa (*Fuzzy Logic System, FLS*) es el único tipo de sistema capaz de tratar simultáneamente con variables numéricas y con variables lingüísticas de modo formal. Las variables numéricas, que son las más habituales, pueden caracterizarse por un valor numérico, por ejemplo, la temperatura del ambiente es 35 °C. Las variables lingüísticas, sin embargo, se caracterizan por un adjetivo que las califica, por ejemplo, la temperatura del ambiente es alta.

Un *FLS* se basa en un mapeo no lineal de un vector de entrada en una salida escalar. La Teoría de Conjuntos Difusos y la Lógica Difusa establecen las especificaciones de este mapeo no lineal. Un *FLS* puede expresarse matemáticamente como una combinación lineal de funciones base difusas, y es un aproximador universal no lineal de funciones, propiedad que comparte con el perceptrón multicapa. El desarrollo en funciones base difusas es muy potente porque éstas pueden obtenerse a partir de datos numéricos o bien conocimiento lingüístico; en ambos casos, se puede presentar en la forma de reglas *If-Then*.

Existen dos tipos de conocimiento sobre un determinado problema:

- Conocimiento objetivo: cuantificado habitualmente mediante modelos matemáticos. Ejemplos: ecuaciones de movimiento de robot, modelos convolucionales que describen un canal de comunicaciones, etc.
- Conocimiento subjetivo: contiene información lingüística que no es posible cuantificar mediante modelos matemáticos tradicionales. Un ejemplo de

este tipo sería la siguiente regla que puede ser válida para seguir la pista de un objeto de grandes dimensiones moviéndose lentamente: Si el objeto está localizado en un lugar en un instante temporal, en el siguiente instante no estará demasiado lejos de ese lugar.

Aunque el conocimiento subjetivo suele ser ignorado a la hora de enfrentarnos a un problema, sí que se tiene en cuenta para evaluar la solución que se le da. Esto sugiere la posibilidad de utilizar ambos tipos de conocimiento para resolver problemas reales, que es lo que hace la Lógica Difusa o *Fuzzy Logic(FL)*.

En la literatura aparecen dos posibles formas de abordar el problema:

- Basado en modelos: la información objetiva se representa por modelos matemáticos, y la información subjetiva por afirmaciones lingüísticas convertidas en reglas, que son cuantificadas usando *FL*.
- Libre de modelos: las reglas se obtiene de los datos numéricos y se combinan con información lingüística usando *FL*.

En la Figura 2.13 se representa un *FLS* ampliamente usado en controladores y aplicaciones de Procesado de señales basado en *FL*. Un *FLS* mapea entradas convencionales (no difusas) en salidas convencionales. Contiene 4 componentes: reglas, fusificador, bloque de inferencia y defusificador.

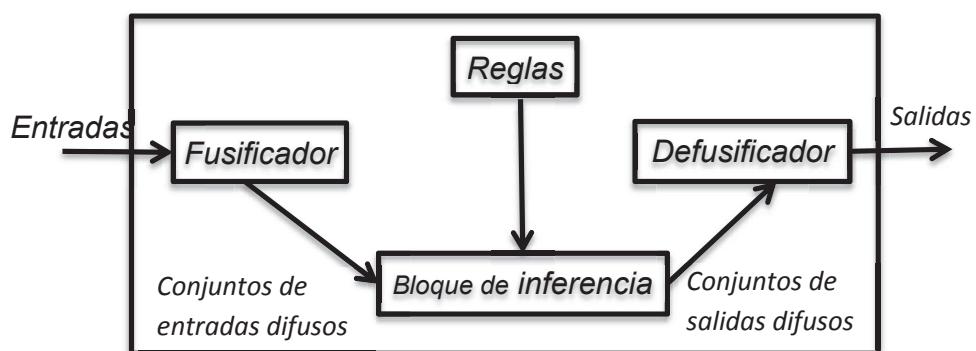


Figura 2.13 Sistema basado en Lógica Difusa (*FLS*). Martín (2008)

El fusificador mapea números convencionales en conjuntos difusos, lo cual es necesario para activar reglas que están en términos lingüísticos, y que tienen conjuntos difusos asociados con ellas.

El bloque de inferencia mapea conjuntos difusos en conjuntos difusos y se encarga de combinar las reglas.

El defusificador mapea conjuntos de salida en números, debido a que en muchas aplicaciones, a la salida de *FLS* se desea obtener un número. Las reglas, que pueden ser facilitadas por expertos o bien ser deducidas a partir de los datos numéricos, son una colección de sentencias *If-Then*, por ejemplo: "Si *a* está caliente y *b* está bajo, entonces gira *c* algo hacia la derecha". Esta única regla revela que necesitamos tener conocimiento de:

1. Correspondencia entre variables lingüísticas y valores numéricos de una variable (por ejemplo, muy caliente se corresponde con 36 °C).
2. Cuantificación de variables lingüísticas (por ejemplo, *a* puede tener asociado un número finito de términos lingüísticos asociados entre extremadamente caliente y extremadamente frío), lo cual se consigue mediante las funciones de partición.
3. Conexiones lógicas para las variables con posterioridad.
4. Implicaciones.
5. Además, será necesario conocer cómo combinar más de una regla.

#### 2.4.1 Conjuntos difusos.

Nguyen et al. (2003) mencionan que es fácil expresar reglas en palabras, pero la noción de falta de claridad lingüística de las reglas *If-Then* debe ser representada de una manera matemática con el fin de hacer uso de esta noción en la teoría de control.

Un subconjunto ordinario *A* de un conjunto *X* puede ser identificado con una función  $X \rightarrow \{0,1\}$  de *X* para el conjunto de dos elementos  $\{0,1\}$ , ecuación 2.20.

$$A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in A \\ 0 & \text{if } x \notin A \end{cases} \quad (2.20)$$

Esta función es llamada función característica o función indicadora del conjunto difuso  $A$ . Si  $A$  es el conjunto de números reales igual o menor a 10 y menor o igual a 40.

Las funciones miembro más utilizadas en la teoría de control son triangulares, trapezoidales, Gaussianas, y sigmoide z y funciones S, como se muestra a continuación.

En la Figura 2.14 y Figura 2.15 se muestran las funciones triangular y trapezoidal respectivamente, las cuales son funciones lineales en algunas caras, son a menudo usadas en aplicaciones. La representación gráfica y operaciones con estos conjuntos difusos son muy simples. También, pueden ser construidas fácilmente en base a pequeña información.

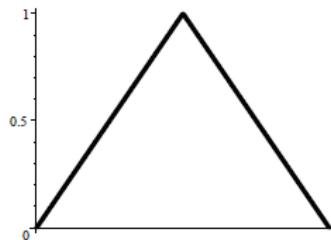


Figura 2.14 Triangular. Nguyen et al. (2003)

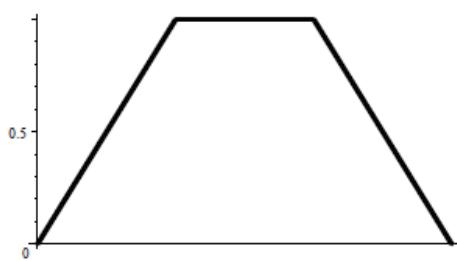


Figura 2.15.Trapezoidal. Nguyen et al. (2003)

La función triangular  $A$  con puntos finales  $(a,0)$  y  $(b,0)$ , y un puntos de altura  $(c,\infty)$  es definida por la ecuación 2.21

$$A(x) = \begin{cases} \alpha \left( \frac{x-a}{c-a} \right) & \text{if } a \leq x \leq c \\ \alpha \left( \frac{x-b}{c-b} \right) & \text{if } c \leq x \leq b \\ 0 & \text{otros valores} \end{cases} \quad (2.21)$$

La función trapezoidal  $B$  con puntos finales  $(a,0)$  y  $(b,0)$ , y puntos de altura  $(c,\alpha)$  y  $(d,\alpha)$  es definido por la ecuación 2.22.

$$A(x) = \begin{cases} \alpha \left( \frac{x-a}{c-a} \right) & \text{if } a \leq x \leq c \\ \alpha & \text{if } c \leq x \leq d \\ \alpha \left( \frac{x-d}{c-d} \right) & \text{if } d \leq x \leq b \\ 0 & \text{otros valores} \end{cases} \quad (2.22)$$

Cuando el dominio es finito, estos conjuntos difusos se pueden representar como en la Figura 2.16 y Figura 2.17.

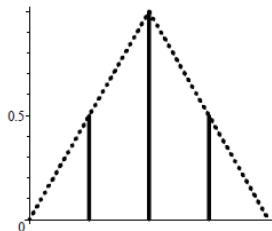


Figura 2.16 Triangular. Nguyen et al. (2003)

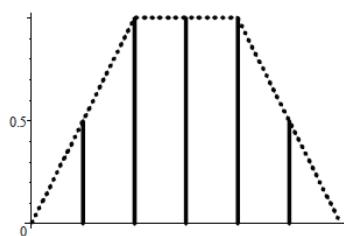


Figura 2.17. Trapezoidal. Nguyen et al. (2003)

La mayoría de los conjuntos difusos son a menudo representados en la misma gráfica, como se muestra en la Figura 2.18.

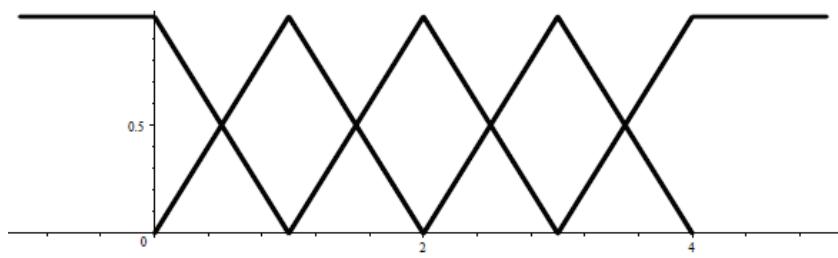


Figura 2.18. Gráfica de conjuntos difusos. Nguyen et al. (2003)

Las funciones gaussianas mostradas en la Figura 2.19 y Figura 2.20, la primera conocida curva en forma de campana, es de la forma de la ecuación 2.23

$$A(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.23)$$

Estas se relacionan con la distribución Gaussiana en probabilidad y tienen útiles propiedades matemáticas.

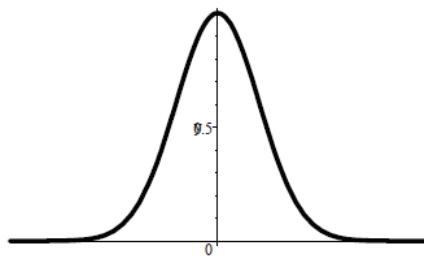


Figura 2.19. Gaussiana  $e^{-\frac{x^2}{2}}$ . Nguyen et al. (2003)

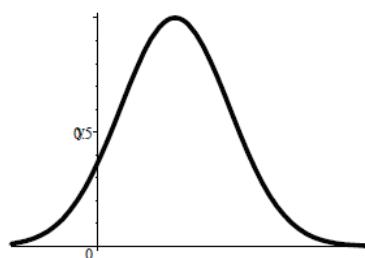


Figura 2.20. Gaussiana  $e^{-\frac{(x-5)^2}{25}}$ . Nguyen et al. (2003)

Los parámetros  $c$  y  $\sigma$  determina el centro y la forma de la curva, respectivamente. Los valores de  $c=0$  y  $\sigma=1$  definen la función miembro de una Gaussiana estándar

$e^{-\frac{x^2}{2}}$ , centrada en  $c=0$ , y con área bajo la curva igual a  $\sqrt{2\pi}$ . Esta es la curva Gaussiana mostrada a la derecha de la Figura 2.21.

Una función de Cauchy, o curva de campana generalizada, está dada por las funciones de la forma  $A(x) = 1/\left(1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}\right)$ . El parámetro  $c$  determina el centro de la curva, a y  $b$  determinan su forma.

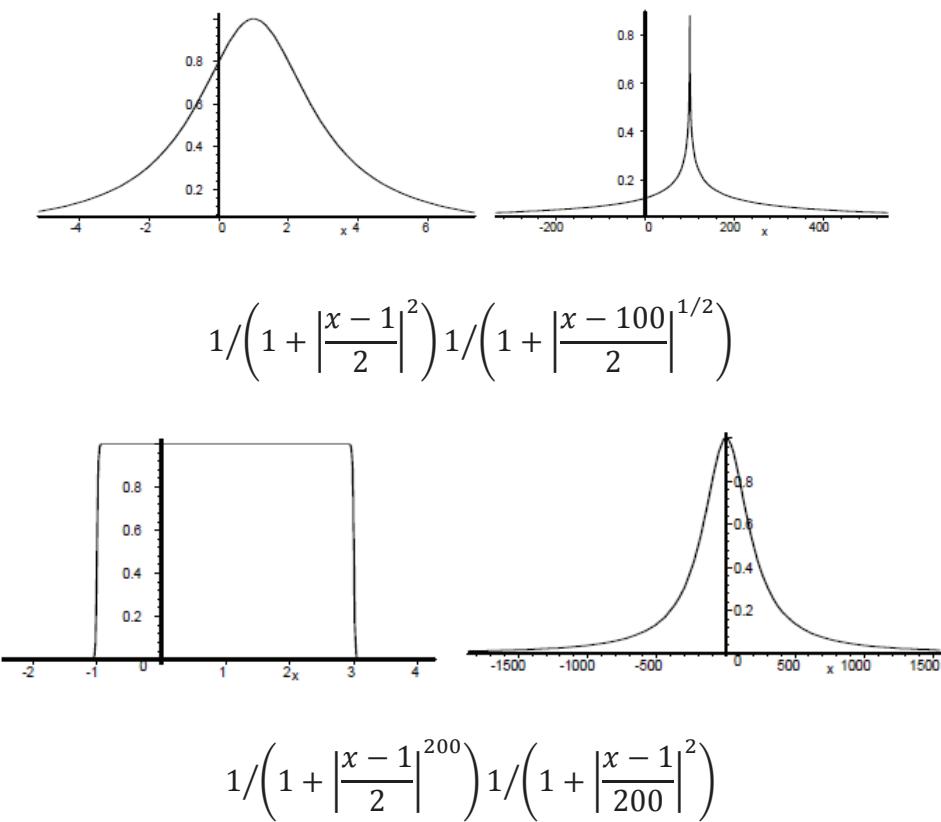


Figura 2.21 Curva de campana generalizada. Nguyen et al. (2003)

Las funciones S en la Figura 2.22 y Z en la Figura 2.23 son funciones sigmoides de la forma de la ecuación 2.24

$$A(x) = \frac{1}{1+e^{-(x-m)\sigma}} \quad (2.24)$$

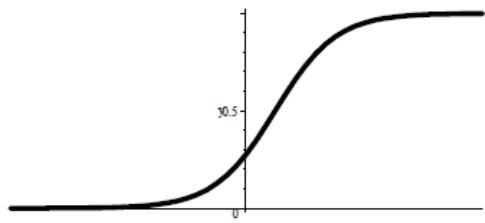


Figura 2.22. Función S  $\frac{1}{1+e^{-x+1}}$ . Nguyen et al. (2003)

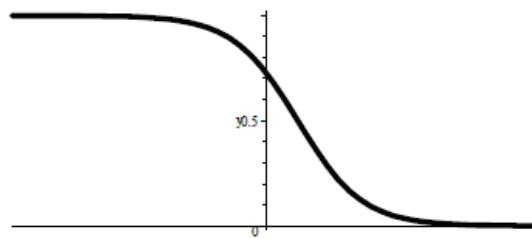


Figura 2.23. Función Z  $\frac{1}{1+e^{x-1}}$ . Nguyen et al. (2003)

Los valores de  $\sigma$  determinan las funciones de incremento Figura 2.24 y decremento Figura 2.25 mientras que el parámetro  $m$  se desplaza hacia la derecha o izquierda de la función. Esta misma forma se puede lograr con funciones de tangente hiperbólica como se muestra en la ecuación 2.25.

$$\frac{1}{2}(1 + \tanh x) = \frac{1}{1+e^{2x}}. \quad (2.25)$$

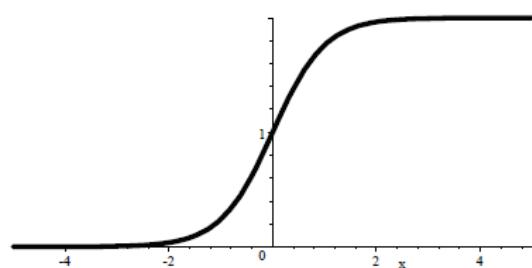


Figura 2.24. Función sigmoide incremental  $1 + \tanh x$ . Nguyen et al. (2003)

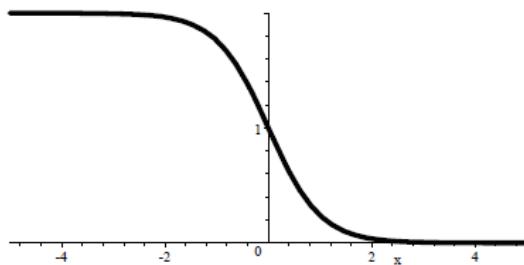


Figura 2.25. Función sigmoide decremental  $1 - \tanh x$ . Nguyen et al. (2003)

El producto de dos funciones sigmoides se usa a veces como se muestra en la Figura 2.26.

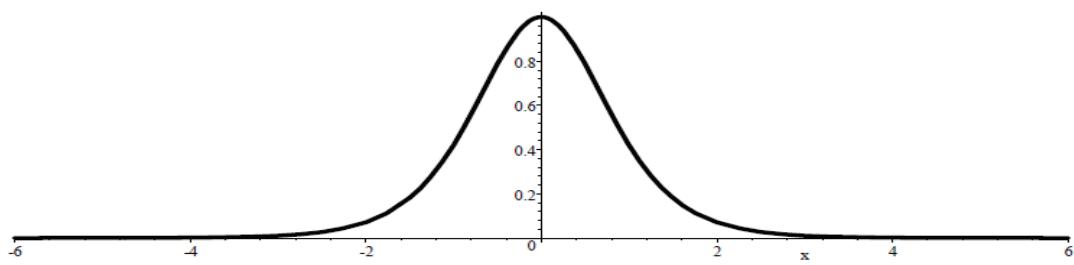


Figura 2.26. Productos de funciones sigmoides  $1 - \tanh^2 x$ . Nguyen et al. (2003)

#### 2.4.2 Defusificación.

Los métodos más comunes para la combinación de reglas difusas producidas por los conjuntos difusos. En la teoría de control, una salida nítida es a menudo necesaria. Esto requiere algún proceso de defusificación para producir un número que mejor refleje al conjunto difuso en el mismo sentido. Hay muchas técnicas de defusificación. En términos generales, hay dos tipos de técnicas de defusificación, momento compuesto y máximo compuesto. “Compuesto” refleja el hecho de que los valores son obtenidos de la combinación de varios conjuntos difusos. La técnica de momento compuesto usa algunos aspectos del primer momento de inercia, y la técnica de máximo compuesto extrae un valor en el que el conjunto difuso alcanza su máximo. Los métodos de centro de área y centro nivelado de área corresponden a la técnica de momento compuesto, y el criterio máximo, primer máximo, y media de máximo corresponden a la técnica de máximo compuesto.

#### 2.4.2.1 Método de centro de área

El método de centro de área, o centro de gravedad, o centroide calcula el centro de área de la región bajo la curva definida por un conjunto difuso y selecciona el primer componente. Si  $C$  es el conjunto difuso en cuestión y  $C$  es integrable, entonces el valor defusificado de  $C$  por este método está dado por la ecuación 2.26.

$$z_0 = \frac{\int_a^b z C(z) dz}{\int_a^b C(z) dz} \quad (2.26)$$

donde  $[a, b]$  es un intervalo contenedor del soporte de  $C$ . Si el soporte de  $C$  es finito, el cálculo está dado por la ecuación 2.27.

$$z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n z_j C(z_j)}{\sum_{j=1}^n C(z_j)} \quad (2.27)$$

#### 2.4.2.2 Método de centro nivelado de área.

El método de defusificación de centro nivelado de área ignora valores del conjunto difuso por debajo de algún nivel  $\alpha$ , entonces usa el método de área en la curva resultante.

#### 2.4.2.3 Método de primer máximo

El primer máximo toma los valores más pequeños en el dominio en el cual el conjunto difuso asume su máximo.

#### 2.4.2.4 Método de criterio de Max

Este método escoge un valor arbitrario del conjunto de valores en el dominio en el cual el conjunto difuso obtiene su máximo.

Un conjunto difuso puede ser considerado como una posible distribución de la variable  $z$ . De la muestra común, podemos tomar  $z_0$  para tener un valor en el cual el grado de posibilidades es la más alta. Esto es el método de defusificación mediante el criterio de Max.

#### **2.4.2.5 Método de máximo promedio**

El máximo promedio, toma el promedio de los más pequeños y largos valores en el dominio en el cual el conjunto difuso asume su máximo.

Este método parece débil, sin embargo, para un conjunto difuso con dos niveles máximos separados es adecuado.

### **2.5 Redes neuro-difusas.**

Lozano et al. (2003) dicen que las redes neuro-difusas son sistemas que incorporan aspectos de las redes neuronales en el sentido de que son sistemas con la capacidad de aprender y generalizar, y aspectos de la lógica difusa ya que trabajan con razonamientos lógicos basados en reglas de inferencia que incorporan la posibilidad de trabajar con variables lingüísticas.

Las redes neuronales son un conjunto de algoritmos matemáticos que encuentran las relaciones no lineales entre conjuntos de datos. En general las redes neuronales tratan de resolver de forma eficiente problemas que pueden encontrarse dentro de tres amplios grupos: optimización, reconocimiento y generalización. Estos tres tipos engloban un elevado número de situaciones, lo que hace que el campo de aplicación de las redes neuronales sea muy amplio. Suelen ser utilizadas como herramientas para la predicción de tendencias y como clasificadoras de conjuntos de datos.

La red neuronal una vez construida constituye un verdadero modelo a “la medida” que actúa en función de lo que percibe y genera conclusiones a la vista de la relación de causa a efecto obtenida de las descripciones introducidas y, de esta manera, facilita predicciones con un importante grado de exactitud. Actualmente existe una gran cantidad de propuestas de combinación de la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales y del procesamiento de información imprecisa de la lógica difusa, de forma que entre ambas se establece una relación bidireccional haciendo posible, por ejemplo, utilizar redes para optimizar ciertos parámetros de los sistemas difusos, así como aplicar la lógica

difusa para modelar un nuevo tipo de neurona especializada en el procesamiento de información de este tipo.

Por otra parte, Martín (2008) establece que la Teoría de Conjuntos Difusos es un método sistemático para trabajar con información lingüística, pudiéndose interpretar la computación numérica usando etiquetas lingüísticas estipuladas por las funciones de partición. Además, una selección adecuada de reglas *If-Then* es el componente primordial de un Sistema de Inferencia Difuso o *Fuzzy Inference System (FIS)* que permite modelar el conocimiento experto humano para una aplicación específica. Aunque un *FIS* tiene la representación del conocimiento estructurada en forma de regla *If-Then*, carece de la adaptabilidad necesaria para cambiar cuando se modifiquen las condiciones externas. Por esta razón, se incorporan conceptos del aprendizaje de las *RNAs* a los Sistemas de Inferencia Difusos, cuyo resultado es un nuevo tipo de topologías conocidas como redes neuro-difusas (*RNDs*)

#### 2.5.1 Características de las redes neuronales-difusas

Martín (2008) menciona que las redes neuro-difusas tienen fundamentalmente las siguientes características:

1. Conocimiento humano: se utiliza en forma de reglas *If-Then* para solucionar problemas reales.
2. Inspiración en modelos biológicos: inspiradas por las redes neuronales biológicas, las *RNAs* son un pilar básico de las *RNDs*, permitiendo tratar con problemas de percepción, reconocimiento de patrones o clasificación.
3. Computación numérica: la computación es básicamente numérica, aunque la perspectiva futura apunta hacia una computación simbólica más cercana a la Inteligencia Artificial (*IA*).
4. Diversos dominios de aplicación: procesado adaptativo de señales, control adaptativo, identificación de sistemas no lineales, regresión no lineal, reconocimiento de patrones, etc.

5. Aprendizaje libre de modelos: las reglas se obtienen a partir de los datos numéricos.
6. Computación intensiva: sin asumir un conocimiento a priori del problema, las *RNDs* dependen mucho de una computación intensiva que permita encontrar reglas o cualquier tipo de regularidad en conjuntos de datos.
7. Tolerancia a fallos: tanto las *RNAs* como los *F/Ss* tienen tolerancia a fallos. La supresión de una neurona en una *RNA* o de una regla en un *F/S*, no tiene por qué destruir el sistema. En realidad, el sistema continúa trabajando debido a su arquitectura paralela y redundante aunque se va deteriorando gradualmente.
8. Distintos caminos para alcanzar el mínimo: se puede llegar al mínimo error por diversos caminos. De hecho, esto no es posible en la medida en que el sistema vaya acercándose hacia el mínimo.
9. Muy indicadas en la resolución de problemas reales: la mayoría de los problemas reales son de una magnitud considerable y se construyen sobre afirmaciones que no se conocen con total certeza. Esto excluye, por tanto, la utilización de métodos convencionales que requieren una descripción detallada del problema a resolver. Las *RDNs* permiten tratamientos que dan soluciones satisfactorias a los problemas del mundo real. De hecho, el campo de aplicación de estos sistemas crece constantemente, aplicándose a nuevas situaciones donde no se han obtenido resultados positivos con otros métodos.

## 2.6 Redes de Petri

García (2004) dice que una red de Petri es un grafo orientado en el que intervienen cuatro tipos de componentes: los lugares (representados por circunferencias), que pueden contener un número nulo o positivo de marcas, y las transiciones (representadas por segmentos rectilíneos), unidos alternativamente por arcos.

Un arco une un lugar a una transición, o viceversa, pero no dos transiciones o lugares. La Figura 2.27 muestra las representaciones de los diferentes

elementos, y la Figura 1.1Figura 2.28 muestra las uniones permitidas y no permitidas en la elaboración de una Red de Petri.

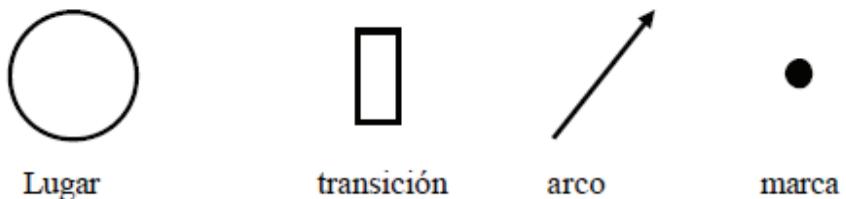


Figura 2.27. Representación de los diferentes elementos de una Red de Petri.  
García (2004)

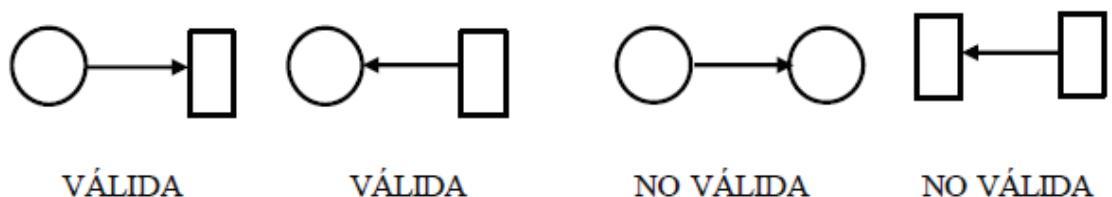


Figura 2.28 Conexiones válidas y no válidas entre lugares y transiciones. García (2004)

Un lugar puede contener un número positivo de marcas, o bien no poseer ninguna marca. Una marca se representa por un punto en el interior del círculo correspondiente al lugar que la contiene. El conjunto de marcas asociadas en un instante dado a cada uno de los lugares constituye un marcado de la Red de Petri.

### 2.6.1 Significado de las componentes de una Red de Petri

García (2004) dice que se pueden establecer los siguientes principios básicos:

- A cada lugar se le asocia una acción o salida del sistema que se desea modelar.
- A cada transición se le asocia un evento.
- Un lugar  $L$  es entrada de una transición  $T$  si existe un arco orientado desde  $L$  hacia  $T$ .
- Un lugar  $L$  es salida de una transición  $T$  si existe un arco orientado desde  $T$  hacia  $L$ .

- Una marca  $M$  puede representar una condición o estado del sistema, o bien puede representar valores físicos.

Como condición, una marca significa que un subsistema del proyecto ha concluido su tarea y está listo para, en conjunto con otro subsistema, un evento futuro pueda ser llevado a cabo.

Como valor físico, una marca puede representar un elemento de una colección de objetos cuya cantidad el sistema se encarga de procesar.

A cada arco se le asocia un valor conocido como peso del arco. El peso del arco es una propiedad que involucra el número de marcas que la transición quita a un lugar de entrada o que agrega a un lugar de salida, cuando la transición es disparada.

### 2.6.2 Sensibilización de una transición

Martínez (2006) Menciona que una transición está sensibilizada si todos los lugares de entrada están marcados. La sensibilización implica que la transición en cuestión tiene la capacidad para ser disparada. Se puede comparar a una función AND aplicada a los lugares de entrada.

Supongamos que una entrada  $T_1$  tiene como entradas los lugares  $L_0$  y  $L_1$ , entonces se puede definir la función de salida  $T_1$  como en la ecuación 2.28.

$$T_{1\text{sal}} = V_{L0} \text{ AND } V_{L1} \quad (2.28)$$

Donde  $V_{L0}$  representaría un valor lógico que sería Verdadero si existiera cuando menos una marca en  $L_0$  y Falso si  $L_0$  tuviera cero marcas.

$V_{L1}$  representaría un valor lógico que sería Verdadero si existiera cuando menos una marca en  $L_1$  y Falso si  $T_1$  tuviera cero marcas.

La Figura 2.29 muestra el concepto descrito

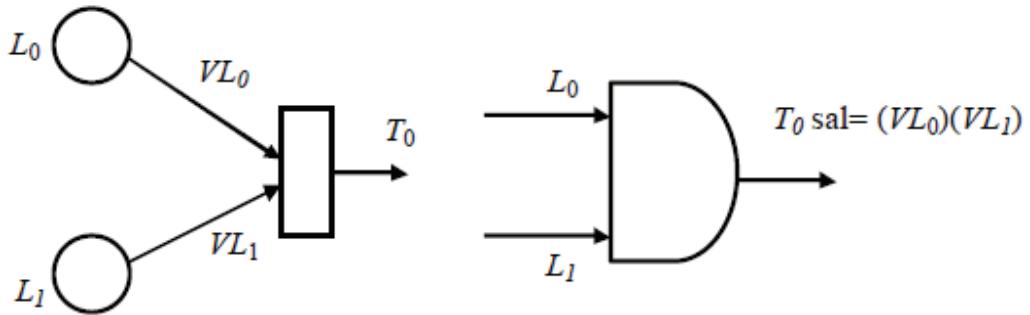


Figura 2.29. Equivalente AND de la sensibilización de una transición. Martínez (2006).

### 2.6.3 Evolución del marcado

Una transición sensibilizada es disparada si el evento que le está asociado se verifica. El disparo de una transición consiste en quitar una marca a cada uno de los lugares de entrada y en añadir una marca a cada uno de los lugares de salida. Para que pueda llevarse a cabo esta operación es necesario que las transiciones de salida no estén en conflicto efectivo.

La Figura 2.30 muestra la evolución de marcado para una Red de Petri.

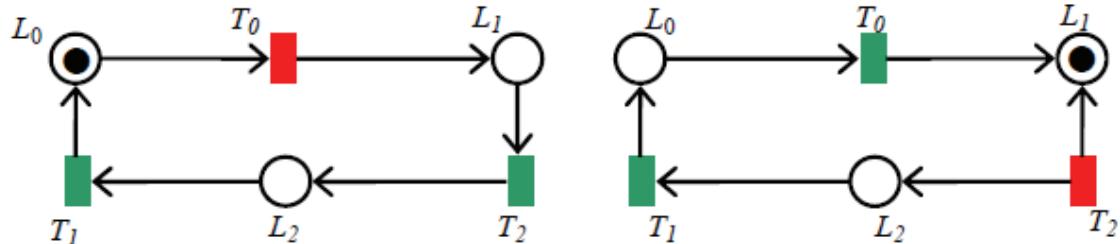


Figura 2.30. Evolución del marcado. Martínez (2006).

Se observa que a partir del marcado inicial que consiste en una marca en  $L_0$ , la transición  $T_0$  se encuentra sensibilizada. Al disparar esta transición, se elimina la única marca en  $L_0$  y se entrega una marca en  $L_1$ , lo cual provoca que ahora la transición  $T_2$  quede sensibilizada.

### 2.6.4 Características de una Red de Petri

García (2004) menciona los siguientes aspectos de las redes de Petri.

- Son una herramienta de modelado claro, fácil de utilizar y no ambigua.
- Facilitan la representación de evoluciones simultáneas. Tienen facilidad de modificaciones locales, y permiten descripciones por refinamientos sucesivos.
- Permiten una primera aproximación al problema de la validación del correcto funcionamiento de un sistema.
- Hacén posible una fácil traducción de las propiedades de buen funcionamiento del sistema en propiedades específicas de las redes de Petri.
- Constituyen una herramienta de modelado independiente de cualquier tecnología.
- El funcionamiento de una red que carece de una interpretación de un sistema específico se define como autónomo.
- Una red temporizada (red cuya evolución es función del tiempo) o interpretada es una red no autónoma.

Dentro de las limitaciones de las redes de Petri existe el hecho de que modelan sistemas basados únicamente en estados finales y eventos que disparan la concurrencia de tales eventos, pero no analizan los instantes intermedios, los cuales están presentes en todos los fenómenos físicos. Por ejemplo, los cambios en la velocidad de las distintas etapas de un proceso debido a las variables del entorno. Por esa razón, es conveniente desarrollar una herramienta que contemple tales comportamientos.

Una Red de Petri se puede simular mediante un lenguaje de propagación, por medio del cual conocer sus características antes de llevarlo a la construcción física.

Existe una variedad de clases y subclases de las Redes de Petri (autónomas, no autónomas, simples, ordinarias, binarias, no binarias, vivas, parcialmente vivas, no vivas, conformes, generalizadas, puras, coloreadas, con arcos inhibidores, de libre elección, con capacidad limitada, temporizada, etc.). Todas estas características conforman la construcción de la red que se deseé

implementar, y cada una de ellas le confiere a la red una personalidad y potencia definida.

#### 2.6.5 Vivacidad

García (2004) dice que el concepto de vivacidad de una Red de Petri es sumamente importante, desde el momento en que el modelo de Red de Petri que representa esta propiedad y que represente a un sistema en particular, va a suponer que éste no representará bloqueos estructurales en su diseño. Lo contrario, es decir, cuando el modelo representativo del sistema presenta transiciones que no puedan ser disparadas a partir de un cierto momento, supone la existencia del concepto del bloqueo.

Implica la posibilidad o imposibilidad de evolución de la red durante el curso de su evolución. Si es imposible que ocurra el disparo de una transición, se dice que el sistema está bloqueado. Si un sistema fue diseñado de tal manera que para todos los marcadores posibles no existe el evento de bloqueo, ya sea total o parcial, se puede entender que la red es viva y que por lo tanto el sistema no va a tener un problema de concepción en su desempeño.

La vivacidad de un sistema se puede analizar desde el punto de vista de una sola transición (transición viva o no viva), o desde el punto de vista de toda la red (red viva o red no viva).

#### 2.6.6 Transición viva

Una transición  $T_i$  es viva, para un marcado inicial  $L_0$ , si para cada marcado alcanzable  $L_i$  existe una secuencia de disparo  $S$ , desde  $L_i$  que contenga a  $T_i$ .

#### 2.6.7 Red viva

Martínez (2006) establece que una red es viva si todas sus transiciones son vivas para un marcado inicial  $L_0$ . La Figura 2.31 muestra una red de Petri en la cual todas sus transiciones pueden llegar a ser vivas.

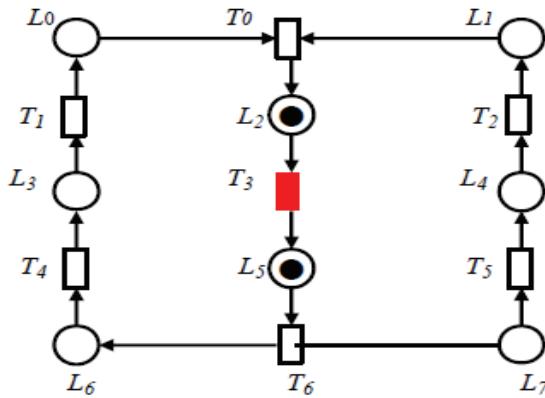


Figura 2.31. Red viva. Martínez (2006).

En la Figura 2.31 se puede observar que, de acuerdo al marcado inicial dado, la transición  $T_3$  está sensibilizada por la marca en el lugar  $L_2$ . Si  $T_3$  se dispara, la marca  $L_2$  se elimina, y  $L_5$  adquiere una marca, con lo cual  $T_6$  queda sensibilizada. Al activar  $T_6$ , la marca en  $L_5$  se elimina y los lugares  $L_6$  y  $L_7$  adquieren una marca, con lo cual  $T_4$  y  $T_5$  quedan sensibilizadas. Al activarse  $T_4$ , la marca en  $L_6$  desaparece y aparece una marca en  $L_3$ , con lo cual la transición  $T_1$  queda sensibilizada. Al activarse  $T_1$ , la marca en  $L_3$  desaparece y aparece una marca en  $L_0$ . Hasta este momento, la transición  $T_0$  no está sensibilizada, para estarlo se necesita que exista una marca en  $L_1$ , lo cual solamente se consigue cuando se sigue la secuencia de disparos de  $T_5$  y  $T_2$ , es esa secuencia. Cuando  $L_1$  adquiere una marca, en ese momento  $T_0$  queda sensibilizada y puede comenzar un nuevo ciclo. Al existir durante toda la evolución cuando menos una transición que pueda ser disparada, se concluye que la red mostrada es viva.

#### 2.6.8 Red parcialmente viva

Una Red de Petri es parcialmente viva si en su evolución, a pesar de que exista alguna transición permanentemente bloqueada, la red pueda seguir evolucionando. La Figura 2.32 corresponde a una red parcialmente viva.

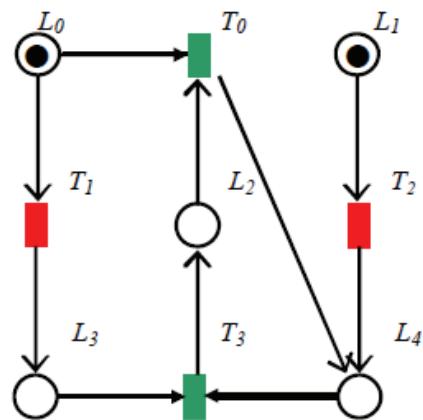


Figura 2.32. Red parcialmente viva. Martínez (2006)

En la Figura 2.32 se observa que para que el sistema evolucione, se debe disparar  $T_2$ , sin embargo, ella sólo puede dispararse una vez, posteriormente queda bloqueada. Por lo tanto, se dice que la red es parcialmente viva, ya que no hay ninguna posibilidad de que  $T_2$  se vuelva a disparar.

#### 2.6.9 Red no viva

Una red no viva es aquella que se bloquea completamente en algún momento de su evolución. La Figura 2.33 corresponde a una red no viva.

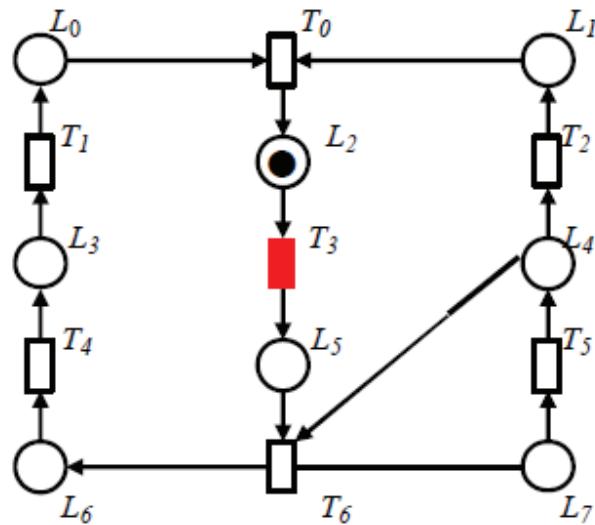


Figura 2.33. Red no viva. Martínez (2006)

En la Figura 2.33 se puede observar que al disparar la transición  $T_3$ , se elimina la marca que se encuentra en  $L_2$ , y se agrega una marca a  $L_5$ . También, se observa que para que la transición  $T_6$  sensibilice, los lugares  $L_4$  y  $L_5$  deben contener cuando menos una marca cada uno. El lugar  $L_4$  no contiene ninguna marca. En esas circunstancias, la transición  $T$  no podrá sensibilizarse y por tanto, la red quedará bloqueada indefinidamente.

## 2.6.10 Red Pura

Una red es pura si ninguna de sus transiciones tiene un lugar que sea simultáneamente de entrada y salida. La Figura 2.34 muestra un ejemplo de red ordinaria y pura.

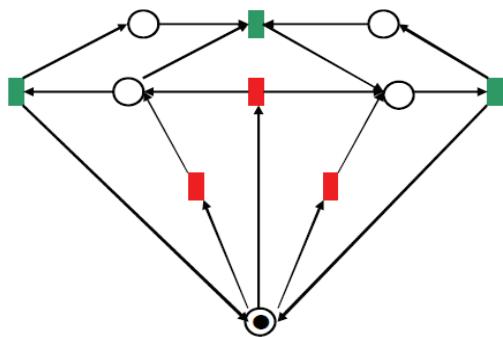


Figura 2.34. Red Ordinaria y Pura. Martínez (2006)

## 2.6.11 Red binaria

Para un marcado inicial dado, una Red de Petri es binaria si cualquier marcado alcanzable es tal que ningún lugar posee más de una marca. En una Red de Petri binaria todo lugar estará marcado con una marca o no estará marcado. Las redes binarias tienen una aplicación fundamental, ya que gran parte de los sistemas que se presentan en la industria están basados en decisiones lógicas (SI, NO; ABIERTO, CERRADO; ENCENDIDO, APAGADO), etc.

Actualmente se está trabajando en los sistemas de control de lógica difusa (lógica fuzz), como una alternativa de representación de los fenómenos físicos. Sin embargo, aún los sistemas basados en lógica difusa tienen como esencia la

manipulación de señales discretas, las cuales son un complemento en la teoría de las redes de Petri. La Red de Petri de la Figura 2.35 es binaria. Se observa que en todos los casos, el máximo número de marcas que puede tener cada lugar es igual a 1.

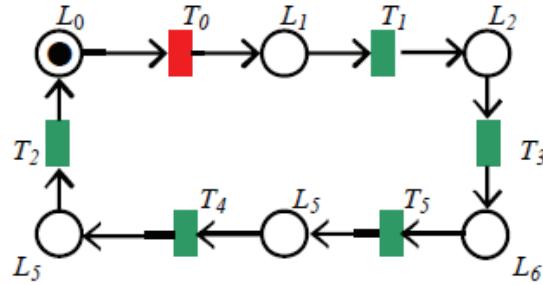


Figura 2.35. Red Binaria. Martínez (2006)

#### 2.6.12 Red no binaria

Una red no binaria es aquella red en la cual el número de marcas de alguno de sus lugares es diferente de 0 o 1. La red de Petri de la Figura 2.36 es no binaria.

Se observa que el número de marcas de la red cruce continuamente, por lo que no tiene límite finito, por lo que se puede sospechar que no es un modelo que representa un sistema válido  $T_0$

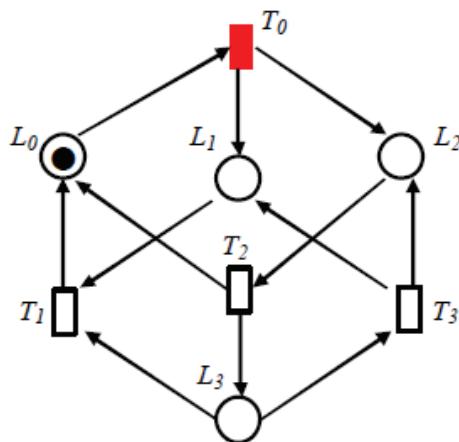


Figura 2.36. Red no Binaria. Martínez (2006)

### 2.6.13 Red de Petri limitada

Según García (2004). Para un marcador inicial, un lugar se denomina limitado si existe un entero natural  $k$ , tal que, para cualquier marcado alcanzable desde  $L_0$ , el número de marcas no es mayor que  $k$ . Si lo anterior se cumple, se dice que el lugar es *k-limitado*. Una Red de Petri es limitada para un marcado inicial  $L_0$ , si todos los lugares son limitados para  $L_0$ .

Un caso particular de las Redes de Petri limitadas son aquellas que únicamente poseen una marca. En tal caso este tipo de Red de Petri recibe el nombre de binarias. Este tipo especial de Redes de Petri binarias y sus derivados, tales como el grafcet, merecen atención especial puesto que su uso se ha generalizado en el diseño de automatismos basados en Autómatas Programables, al igual que en lógica cableada mediante módulos secuenciadores. La Figura 2.37 muestra una red 3-limitada.

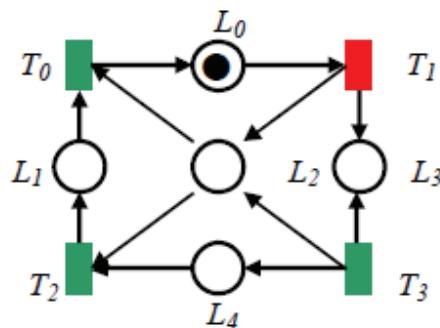


Figura 2.37. Red 3-limitada. Martínez (2006)

En la Figura 2.37 se observa que la marca existente en  $L_0$  determina que la transición  $T_1$  quede sensibilizada. Al disparar  $T_1$  se elimina la marca en  $L_0$  y se crea una marca en  $L_2$  y una marca en  $L_3$ , con lo cual el número total de marcas de la red es de 2. En virtud de que  $T_0$  y  $T_2$  necesitan una marca en  $L_1$  y una marca en  $L_4$  respectivamente para poder ser sensibilizadas, ninguna de ellas, ni  $T_0$  ni  $T_2$  podrán ser disparadas. La única transición sensible es  $T_3$ . Al ser disparada ésta transición, se elimina la marca de  $L_3$  y se crea una marca en  $L_4$ . El número total de marcas de la red es ahora igual a 3. La única transición sensibilizada es  $T_2$ .

Cuando esta transición se dispara, se elimina una de las marcas de  $L_2$ , con lo cual solamente se queda con 1; mientras tanto,  $L_4$  pierde la marca que tenía y se crea una marca en  $L_1$ . El número total de marcas de la red es ahora igual a 2. La única transición sensible es  $T_0$ . Al ser disparada esta transición  $T_0$ , se elimina la marca tanto en  $L_2$  como en  $L_1$ , y se crea una marca  $L_0$ , con lo cual es posible comenzar un nuevo ciclo. La conclusión que se pudo establecer es que el límite de marcas de la red es 3. La red mostrada, por lo tanto, se define como 3-limitada.

#### 2.6.14 Red ordinaria

Redes de Petri ordinarias, son aquellas en las que los pesos asociados a los arcos toman como máximo un valor 1, es decir,  $w \in \{0,1\}$ . La representación gráfica de este tipo de Red de Petri, queda establecida con solo representar el arco en cuestión sin ningún otro tipo de notación. Para algunos sistemas, las Redes de Petri ordinarias son una forma limitada para representarlos. En este caso, conviene trabajar con redes cuyos arcos tengan pesos mayores a 1, tal como para las redes que representan sistemas de flujo de información que transportan paquetes de datos (por ejemplo, los puertos que manejan 8, 16 o 32 bits), o los contenedores de un puerto marítimo.

#### 2.6.15 Red de Petri generalizada

Brams (2005) dice que son como las ordinarias con la diferencia que existen pesos diferentes asociados a los arcos. Esto indica que cuando se dispara esta transición, se quitan tres marcas del lugar de entrada y se añaden dos marcas al lugar de salida. Es decir, para disparar la transición se necesitan tres marcas en el lugar de entrada.

#### 2.6.16 Redes de Petri coloreadas

En ellas se identifican los tokens por colores (en general, las redes de Petri donde se identifican los tokens se denomina redes de Petri de alto nivel).

### 2.6.17 Redes de Petri temporizadas

En ellas existe un tiempo asociado, ya sea a un lugar o a una transición. Si es a un lugar es que un token sólo puede permanecer ese tiempo en dicho lugar. Si es a una transición indica el tiempo límite para realizar la acción asociada a una transición.

### 2.6.18 Conflicto estructural

Martínez (2006) dice que en una Red de Petri existe conflicto estructural cuando un lugar posee más de una transición de salida. El conflicto estructural es fácilmente observable durante el proceso de diseño, ya que invariablemente, cuando el usuario coloca dos o más transiciones como salidas del mismo lugar, este conflicto se encuentra presente.

Si existe algún conflicto estructural, es posible que durante la evolución de la red se presente un conflicto efectivo, y el modelo no representa claramente el sistema que se desea construir. La Figura 2.38 exhibe un conflicto estructural, puesto que  $T_1$  y  $T_3$  son transiciones de salida de un mismo lugar,  $L_1$ . La existencia de un conflicto estructural no es condición suficiente para que haya conflicto efectivo. Desde la etapa de diseño se puede observar que existe un conflicto estructural en  $L_1$ .

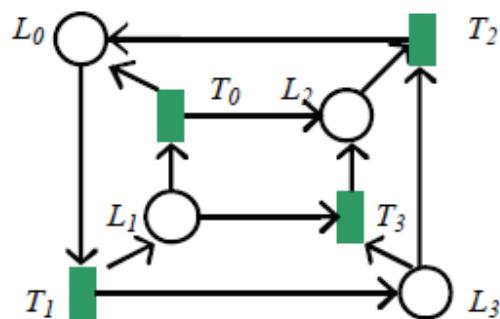


Figura 2.38. Conflicto estructural. Martínez (2006).

### 2.6.19 Conflicto efectivo

Un conflicto estructural se hace efectivo si los eventos asociados a dos o más transiciones simultáneamente sensibilizadas que descienden de un mismo

lugar se verifican simultáneamente, y ese lugar no dispone de un número de marcas suficientes para dispararlas simultáneamente. La Figura 2.39 muestra una Red de Petri que contiene un conflicto efectivo potencial, el cual se verificaría si  $T_2$  y  $T_5$ , se activaran simultáneamente.

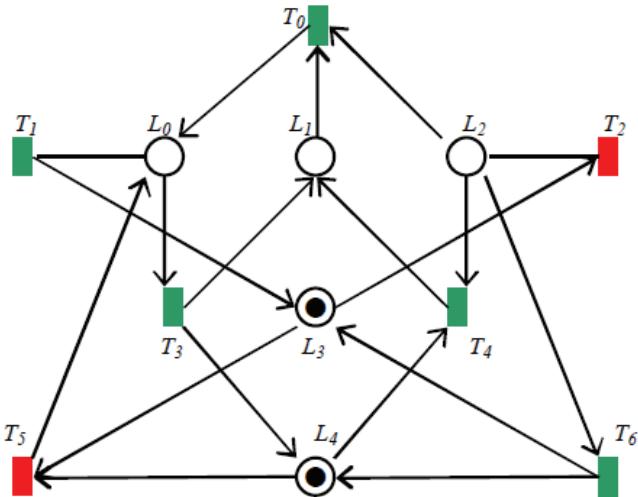


Figura 2.39. Conflicto efectivo. Martínez (2006).

La Red de Petri de la Figura 2.39 presenta un conflicto efectivo potencial pues las transiciones  $T_2$  y  $T_5$  son transiciones de salida del lugar  $L_3$ , el cual contiene solamente una marca. No todos los conflictos estructurales dan lugar a conflictos efectivos. Inclusive, es posible que se necesite que una red contenga conflictos estructurales para representar adecuadamente el modelo que se desea implementar. Para que una red pueda considerarse como un modelo que proporcione una descripción correcta del mismo sistema que se desea construir, se debe cumplir que la red no posea conflictos efectivos. El conflicto efectivo se resuelve normalmente, estableciendo una exclusión mutua entre los eventos asociados a las transiciones, o bien, estableciendo una prioridad más alta de disparo a una de las transiciones.

#### 2.6.20 Exclusión mutua

Si en un sistema dos estados (representados por lugares) nunca pueden ocurrir simultáneamente por un marcado inicial determinado  $M_0$  en todos los

marcados alcanzables a partir de  $M_0$ , se dice que los lugares están en exclusión mutua para  $M_0$ . La red de Petri de la Figura 2.40 no presenta conflicto efectivo para el marcado inicial indicado, puesto que  $L_3$  y  $L_4$  no llegan a estar marcados simultáneamente.

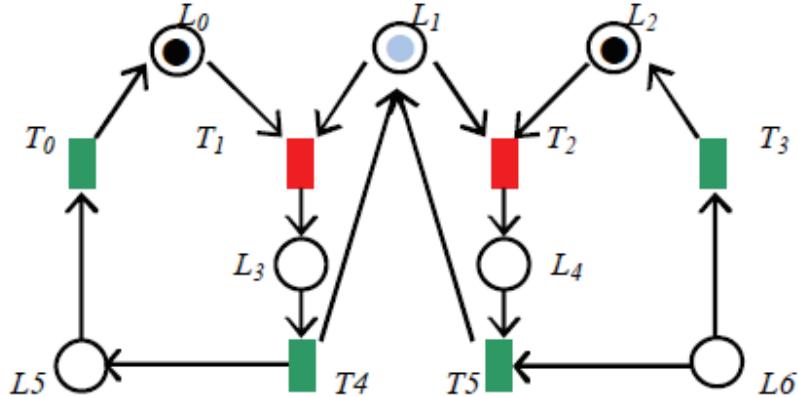


Figura 2.40. Exclusión mutua. Martínez (2006).

A pesar de que en el lugar  $L_1$  se presenta un conflicto, este se evita considerando que una de las transiciones de salida de este lugar, ya sea  $T_1$  y  $T_2$ , tiene prioridad de disparo, sobre la otra transición.

## 2.7 Fotorresistencias (LDR)

Pallás (2003) establece que las fotorresistencias o fotoconductores (*Light Dependent Resistors*) se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir en él radiación óptima (radiación electromagnética con longitud de onda entre 1 mm y 10 nm). Su símbolo es el de la Figura 2.41 a.



Figura 2.41. Fotorresistencia (LDR). A) Símbolo. b) Modelo de bajo costo encapsulado en plástico transparente. Pallás (2003).

La conductividad eléctrica en un material depende del número de portadores en la banda de conducción. En un semiconductor, a baja temperatura la mayor parte de sus electrones están en la banda de valencia, y se comporta casi como aislante. Pero al aumentar la temperatura, y con ella la agitación los electrones, dado que las bandas de valencia y de conducción están próximas, cada vez hay más electrones que saltan de la banda de valencia a la conducción, aumentando la conductividad. Si el semiconductor está dopado, este salto es aún más fácil.

La energía necesaria para producir el salto puede venir de otras fuentes externas de calor, como puede ser una radiación óptica o una tensión eléctrica. En el caso de la radiación óptica, su energía,  $E$ , y frecuencia,  $f$ , están relacionadas mediante la expresión  $E=hf$ .

Donde  $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$  es la constante de Plack. Entonces si la radiación tiene energía suficiente para permitir el salto de los electrones de una a otra banda, pero sin exceder el umbral necesario para que se desprendan del material, se tendrá efecto fotoeléctrico interno o fotoconductor, y a mayor iluminación mayor será la conductividad. Si se excediera dicho umbral, se tendría efecto fotoeléctrico externo.

## METODOLOGÍA

---

Este proyecto consta de varias etapas, la primera es la instrumentación del fitotrópico ya que se contaba con un prototipo de la cámara de crecimiento la cual se muestra en la Figura 3.1, pero este era solamente una carcasa, así que para llevar a cabo el sistema de control de iluminación se instalaron las lámparas, los actuadores. Sensores y la tarjeta en donde se implementó el controlador. La segunda etapa fue el desarrollo de la tarjeta de potencia de las lámparas y acondicionamiento de señal del sensor, la tercera etapa fue la implementación en hardware del controlador y la cuarta etapa fue la experimentación. Cada una de las etapas se detalla más adelante. En la figura 4 se muestra el prototipo de fitotrópico utilizado. Las dimensiones externas son: altura=1.86 m, largo=2.03 m, ancho= 0.86m. Las dimensiones internas son: altura=1.7 m, largo=1.1 m y ancho=0.7 m.



Figura 3.1. Fitotrópico

### 3.1 Instrumentación de fitotróon

#### 3.1.1 Distribución de lámparas

En la Figura 3.2 se muestra la distribución de las lámparas y en la Figura 3.3 se muestran las lámparas colocadas dentro del fitotróon. Las lámparas que se utilizaron son incandescentes y fluorescentes, como ya se mencionó, se utilizaron este tipo de lámparas para la regulación de iluminación (incandescente) y para disminuir el calor emitido por las lámparas y hacer más eficiente el consumo de energía eléctrica (fluorescentes). Las lámparas incandescentes que se utilizaron son 6 lámparas incandescentes de 60 W bellalux, soft azul de la marca OSRAM, esta lámpara se seleccionó porque al tener el cristal blanco, emite luz menos amarilla la cual beneficia a las plantas. Las lámparas fluorescentes que se utilizaron 12 lámparas fluorescentes de 110W, arranque rápido F48T12/CW/1500 de la marca GE Lighting las cuales proporcionan una iluminación de 6200 lúmenes iniciales y 4030 lúmenes medios.

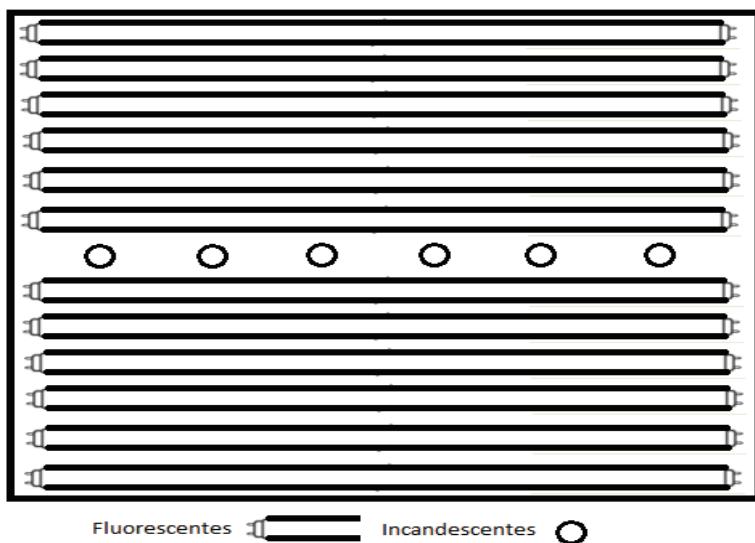


Figura 3.2. Distribución de lámparas

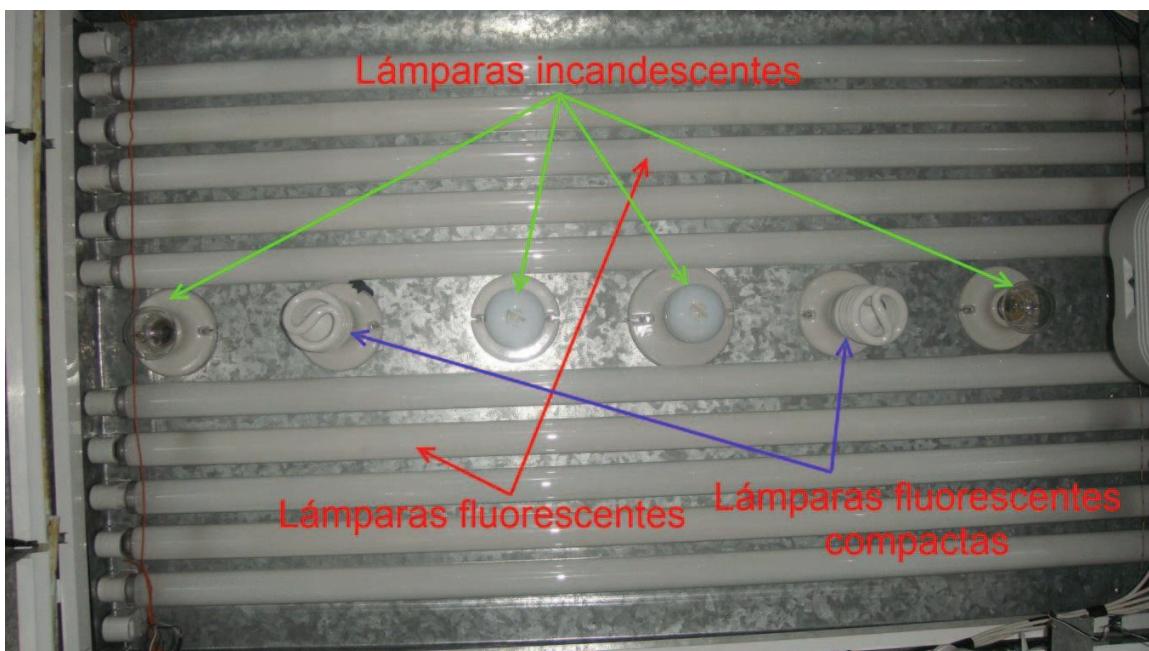


Figura 3.3. Distribución de lámparas dentro de fitotrón

### 3.1.2 Colocación de sensor de iluminación

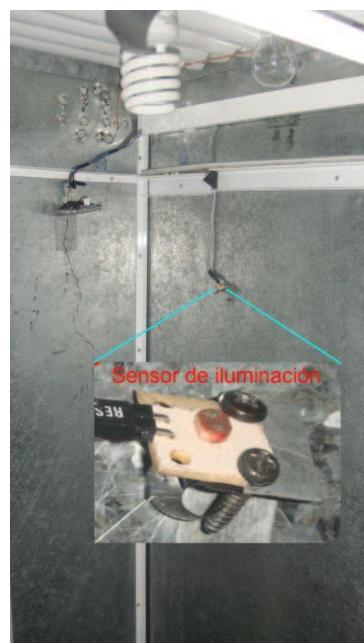


Figura 3.4. Distribución de sensor de iluminación dentro del fitotrón

### 3.1.3 Tarjeta de potencia.

Como se utilizó para implementar el hardware del sistema de control una tarjeta de desarrollo FPGA, las señales de control requieren una etapa de potencia para poder ser utilizadas en los actuadores que controlan el encendido de las lámparas, se desarrolló la tarjeta mostrada en la Figura 3.5 que corresponde al diseño PCB de la tarjeta y la Figura 3.6 que corresponde a la tarjeta físicamente.

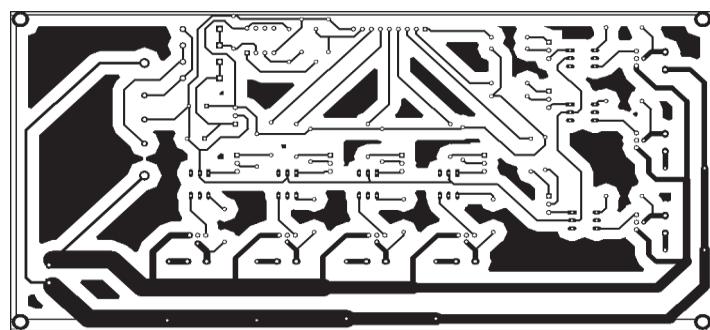


Figura 3.5. Diseño PCB de tarjeta de potencia

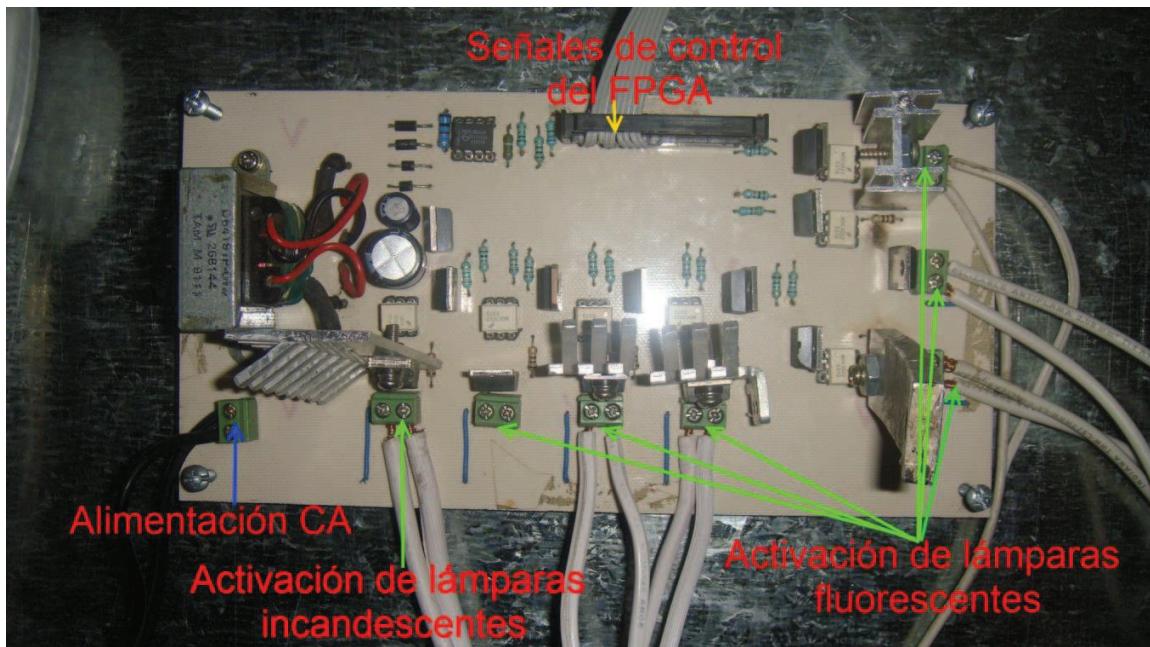


Figura 3.6. Tarjeta de potencia

### 3.1.4 Tarjeta de sensores.

La señal que proporcionan los sensores debe ser acondicionada a una señal equivalentes al sistema de control digital, por eso se desarrolló la tarjeta mostrada en la Figura 3.7 que corresponde al diseño PCB de la tarjeta del sensor y la Figura 3.8 que corresponde al la tarjeta fisica del sensor. Para este proyecto se utilizó como sensores de iluminacion dos LDR VT90N1 de la marca PerkinElmer optoelectronics.

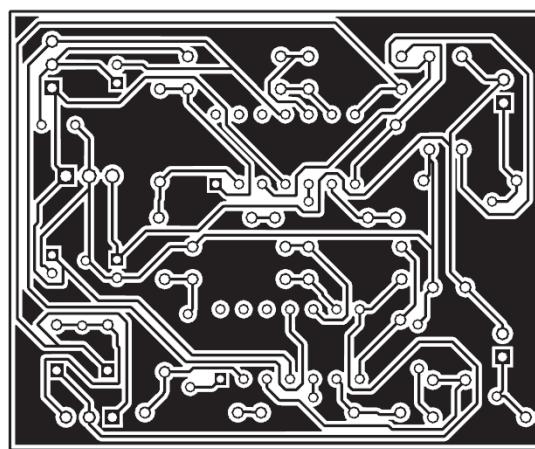


Figura 3.7. Diseño PCB de tarjeta de sensor

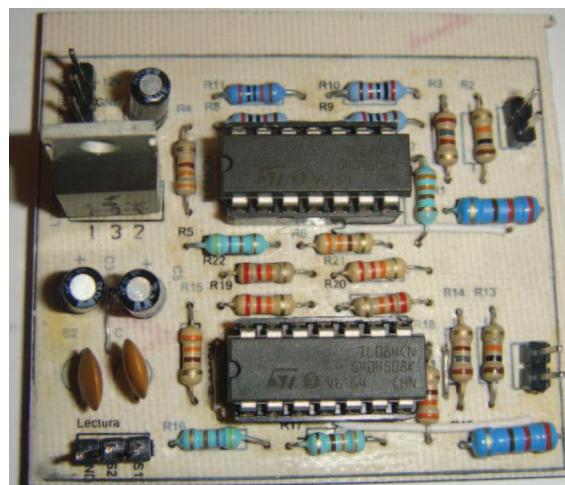


Figura 3.8. Tarjeta de sensores

### 3.1.5 Tarjeta de desarrollo FPGA

La tarjeta de desarrollo FPGA mostrada en Figura 3.9 es utilizada para implementar el controlador digital es una tarjeta desarrollada en la UAQ por HSP, Cuerpo académico Mecatrónica. Esta tarjeta tiene un FPGA Spartan 3E de 1600000 compuertas, 8 salidas analógicas de  $\pm 10V$ , 8 entradas analógicas, 16 entradas digitales TTL, 16 salidas digitales TTL, 3 DIP switch, puerto RS232, puerto USB, memoria serial de 32KB, memoria estática de 512KB, memoria dinámica de 4MB, Oscilador de 48MHZ y configuración vía JTAG o de memoria flash.



Figura 3.9. Tarjeta de desarrollo FPGA

## 3.2 Linealización del sensor

Debido a que la respuesta del sensor no se comporta de manera lineal, fue necesario obtener una ecuación que de alguna manera nos relacionara la señal que nos proporciona el sensor con la referencia, debido a ello se obtuvo la respuesta del sensor ante diferentes valores de referencia y se obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 3.10. Gráfica de respuesta de sensor que corresponde al sensor 1 (verde) y sensor 2 (amarillo).

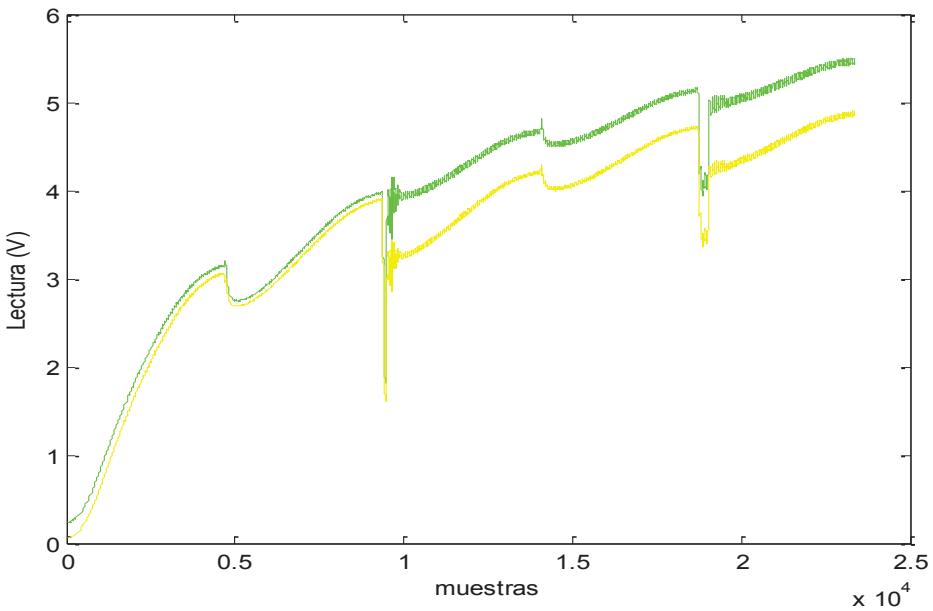


Figura 3.10. Gráfica de respuesta de sensores

Mediante las gráficas mostradas anteriormente se approximó la respuesta del sensor a una función lineal, obteniendo las ecuaciones 3.1-5 que corresponde al sensor 1 y ecuación 3.6-10 que corresponde al sensor 2.

$$1.3494e^{-5}x^3 - 0.0111x^2 + 5.4409x - 221.401 \quad (3.1)$$

$$6.4162e^{-5}x^3 - 0.1262x^2 + 87.1332x - 1.7633e^4 \quad (3.2)$$

$$4.3889e^{-4}x^3 - 1.125x^2 + 969.3124x - 2.7482e^5 \quad (3.3)$$

$$8.9894e^{-4}x^3 - 2.6936x^2 + 2.7001e^3x - 8.9833e^5 \quad (3.4)$$

$$0.0014x^3 - 10.544x^2 + 4.5701e^3x - 1.591e^6 \quad (3.5)$$

$$1.2568e^{-5}x^3 - 0.009 + 4.4096x + 11.7595 \quad (3.6)$$

$$7.7392e^{-5}x^3 - 0.1482x^2 + 99.1992x - 1.9689e^4 \quad (3.7)$$

$$2.3489e^{-4}x^3 - 0.5074x^2 + 372.0034x - 8.66e^4 \quad (3.8)$$

$$8.141e^{-4}x^3 - 2.1756x^2 + 1.9478e^3x - 5.7594e^5 \quad (3.9)$$

$$7.9815e^{-4}x^3 - 2.1507x^2 + 1.9428e^3x - 5.778e^5 \quad (3.10)$$

En la Figura 3.11 se muestra la respuesta de los sensores después de utilizar las ecuaciones de aproximación lineal.

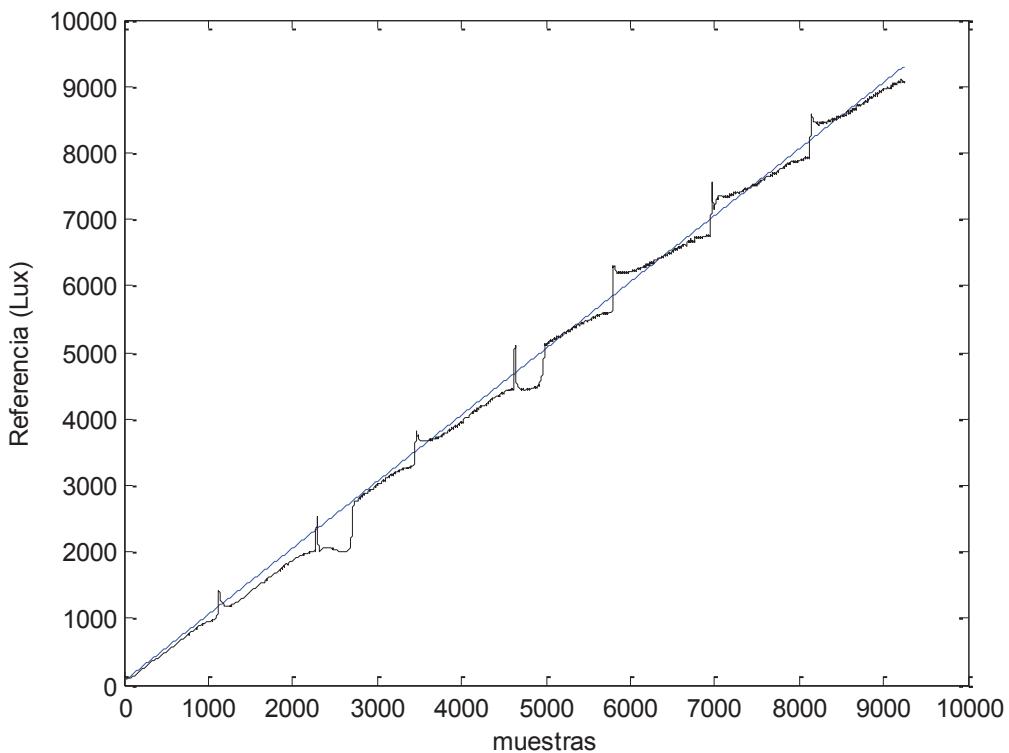


Figura 3.11. Gráfica de respuesta lineal de sensores

### 3.3 Sintonización de planta de sistema.

Al tener una relación entre la referencia y la señal del sensor, se puede adquirir la respuesta del sistema ante diferentes entradas de referencia con un error menor. La sintonización de la planta se realizó utilizando una aplicación de MATLAB que permite obtener la función de una serie de datos los cuales en este caso son los datos adquiridos de la respuesta del sistema. En la Figura 3.12 se muestra la gráfica de la respuesta del sistema sin control ante diferente referencia.

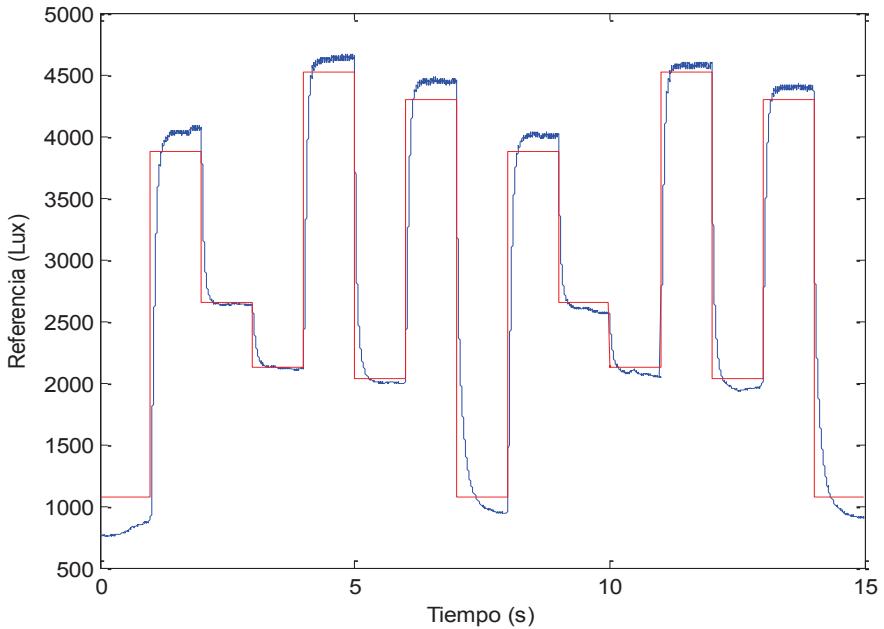


Figura 3.12. Respuesta de sistema de iluminación sin control

La función de transferencia de la planta es la mostrada en la ecuación 3.3.

$$G(s) = \frac{0.94638}{0.054171s+1} \quad (3.3)$$

### 3.4 Control Difuso

#### 3.4.1 Fusificación

Para hacer el diseño digital del control difuso se utilizan funciones de pertenencia triangulares para las entradas y la salida. Para este proyecto se proponen dos entradas y una salida. Para la entrada 1 se definen las funciones de pertenencia mostradas en la Figura 3.13 en donde los parámetros de los conjuntos se basan en el error de iluminación que se tiene en el sistema, en este caso solamente se utiliza un rango de iluminación en el que operan las lámparas regulables.

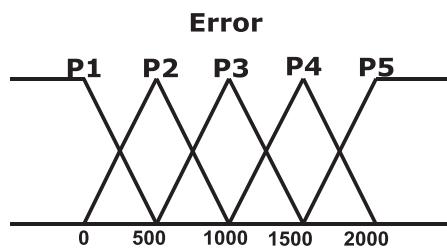


Figura 3.13. Funciones de pertenencia para entrada 1.

Para la entrada 2 se definen las funciones de pertenencia mostradas en la Figura 3.14.

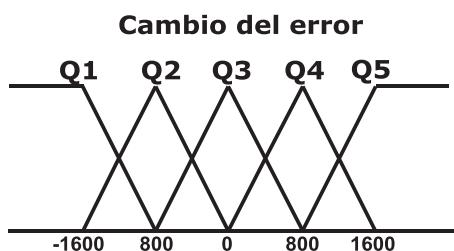


Figura 3.14. Funciones de pertenencia para entrada 2.

Para la salida se definen las funciones de pertenencia mostradas en la Figura 3.15. Los parámetros de los conjuntos de salida se basan en el rango de iluminación que pueden proporcionar las lámparas atenuables ya que para las lámparas on-off se utiliza otra técnica de control para ser activadas.

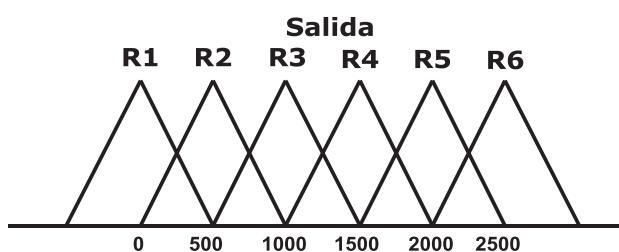
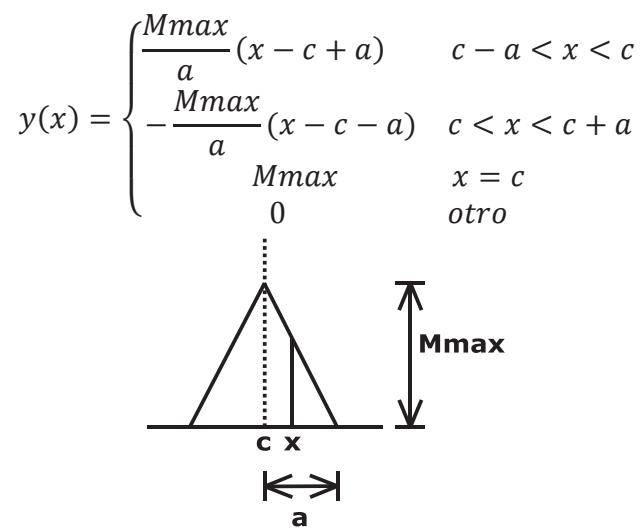


Figura 3.15. Funciones de pertenencia para la salida.

Como ya se definió que la función de pertenencia es de forma triangular, entonces continua el diseño de la estructura que representa la siguiente función:



Donde **Mmax** representa el valor máximo que tiene la función de pertenencia que en este caso es “1”, **c** representa el centro de cada función de pertenencia, **a** representa la apertura de la función de pertenencia, es decir la mitad de la base que tiene el triángulo y **x** representa la entrada. En la Figura 3.16 se muestra la estructura que representa a la función anterior.

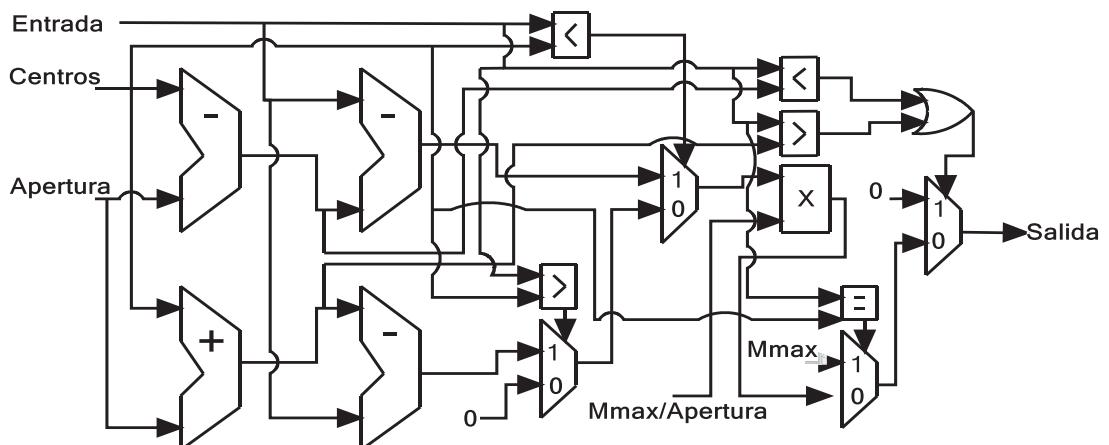


Figura 3.16. Estructura digital de función triangular.

Como cada entrada contiene varias funciones de pertenencia, no es adecuado implementar la estructura anterior para cada función de pertenencia, por esto se diseñó la estructura mostrada en la Figura 3.17 para que así solo se utilice una estructura triangular. En este diseño se evalúa una función de pertenencia a la vez

y se almacena su resultado en registros, ya que se evalúa la primera función de pertenencia, se seleccionan los parámetros de la siguiente función de pertenencia y se evalúa. Este proceso se hace hasta evaluar todas las funciones de pertenencia con cada una de las dos entradas actuales y se almacenan los resultados en registros para así ser utilizados por la etapa de inferencia.

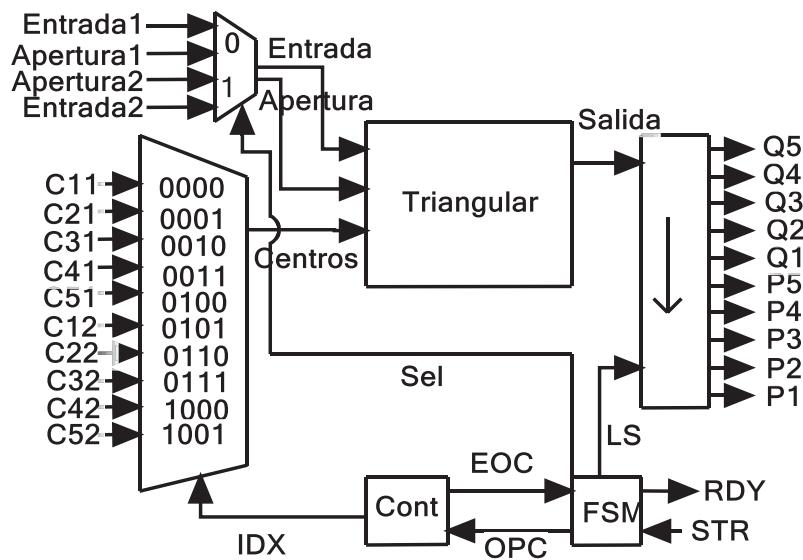


Figura 3.17. Estructura digital de evaluación de funciones de pertenencia.

### 3.4.2 Etapa de inferencia.

Para implementar la etapa de inferencia se utilizaron las reglas mostradas en la Tabla 3.1, para que en base a ellas se diseñe la estructura que realiza la interpretación de las reglas para obtener una salida (R) correspondiente a las entradas (P y Q).

Tabla 3.1. Base de reglas

	P1	P2	P3	P4	P6
Q1	R3	R4	R5	R6	R6
Q2	R2	R3	R4	R5	R6
Q3	R1	R2	R3	R4	R5
Q4	R2	R3	R4	R5	R6
Q5	R3	R4	R5	R6	R6

En la Figura 3.18 se muestra la estructura de evaluación de reglas R. Para cada conjunto de salida se utiliza una de estas estructuras, en donde dependiendo de las entradas que influyen en un conjunto de salida, se cambian las entradas a evaluar y después de evaluar cada conjunto de salida, se obtiene su nivel de pertenencia para cada uno de ellos.

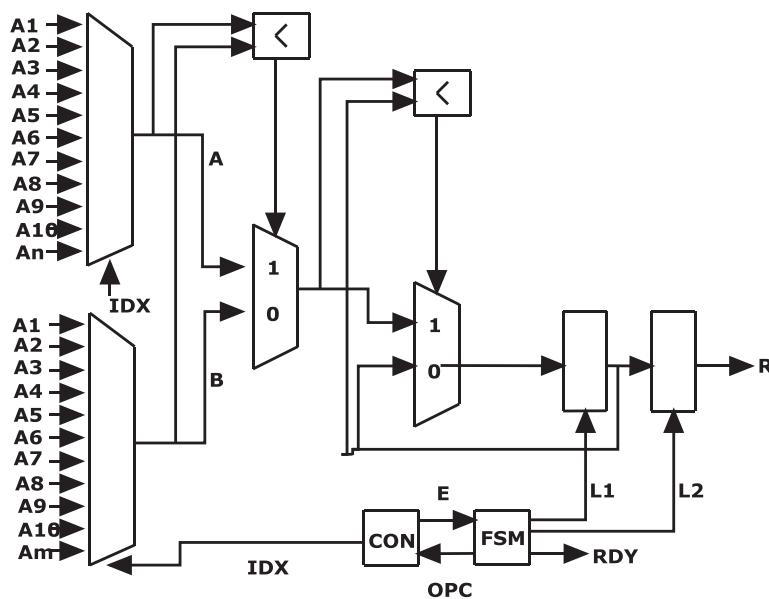


Figura 3.18. Esquema de evaluación de reglas

### 3.4.3 Defusificación

Ya que se tienen los valores obtenidos al evaluar las reglas propuestas, se diseña una estructura para realizar uno de los métodos utilizados para defusificar, en este caso se utilizó el método de promedio de centros el cual tiene la siguiente forma:

$$\text{Salida} = \frac{CR1 * R1 + CR2 * R2 + CR3 * R3 + CR4 * R4 + CR5 * R5}{R1 + R2 + R3 + R4 + R5}$$

Donde CR representa el centro de cada función de pertenencia de salida, R representa el valor que tiene cada función de pertenencia después de evaluar las entradas y las reglas propuestas.

La estructura que realiza la función del numerador se muestra en la Figura 3.19. Esta estructura se basa en una MAC en donde se va seleccionando cada una de las entradas y después de realizar la multiplicación entre ellas se acumula cada resultado obtenido de la multiplicación y al final se obtiene como resultado la sumatoria de todo.

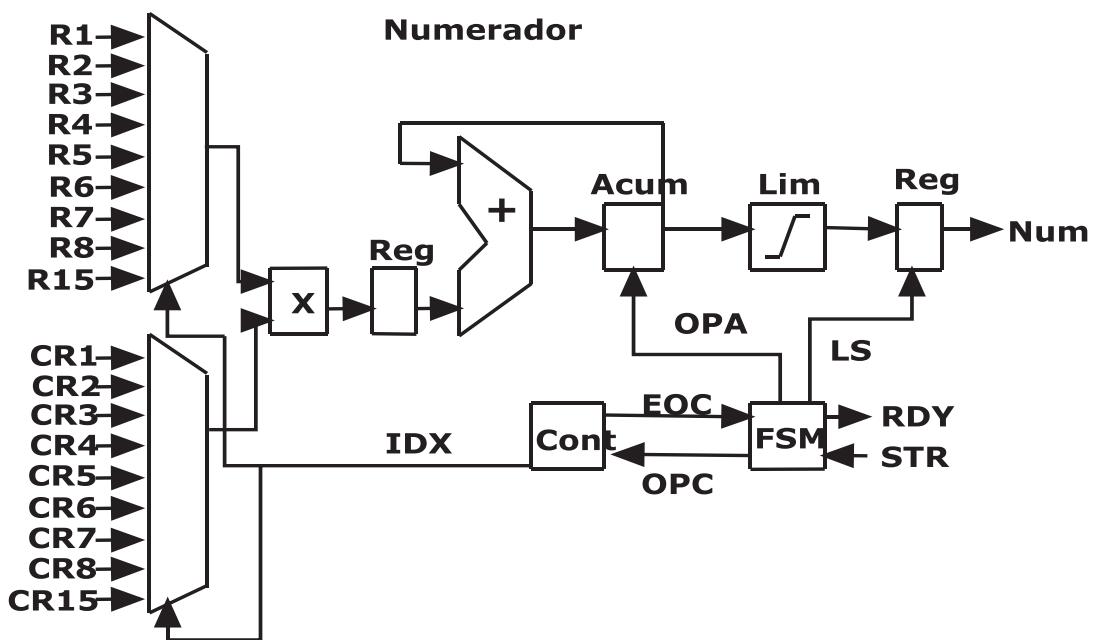


Figura 3.19. Estructura digital utilizada para obtener el numerador de la función de salida.

En la Figura 3.20 se muestra la estructura utilizada para obtener el denominador de la función de salida. En este caso la estructura es similar a la estructura utilizada para el numerador, su diferencia es que solo se realiza la sumatoria de las diferentes entradas.

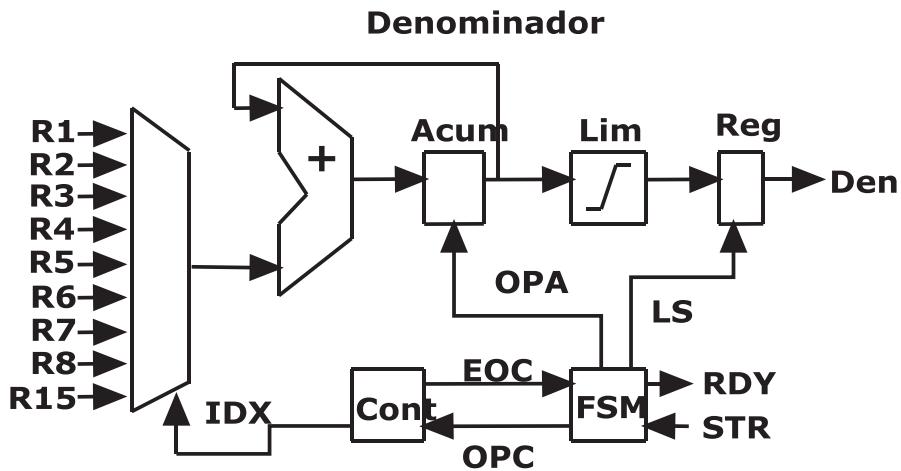


Figura 3.20. Estructura digital utilizada para obtener el denominador de la función de salida.

Ya que se tienen los resultados del numerador y denominador de la función de salida, se realiza la división para obtener el resultado final. En la Figura 3.21 se muestra el bloque que representa la forma en cómo se obtiene el resultado después de aplicar el método de promedio de centros en la defusificación.

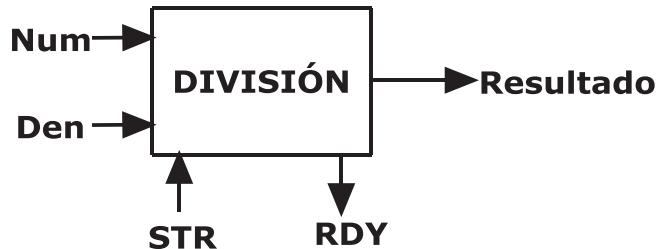


Figura 3.21. Bloque de obtención de resultado final de defusificación.

#### 3.4.4 Sintonización de control difuso

En la Figura 3.22 se muestra la simulación del comportamiento del sistema de iluminación al utilizar un controlador difuso. Para esta simulación se realizó un programa en MatLab de un control difuso y se utilizó la función de transferencia obtenida del sistema para utilizarla dentro de la simulación y así observar cómo se comportaría el sistema con diferentes configuraciones de las reglas de inferencia. Al obtener una respuesta adecuada, se asigna la configuración de las reglas de

inferencia en el hardware para posteriormente probar el sistema de control real. La configuración de reglas de inferencia es la mostrada en la Tabla 3.1.

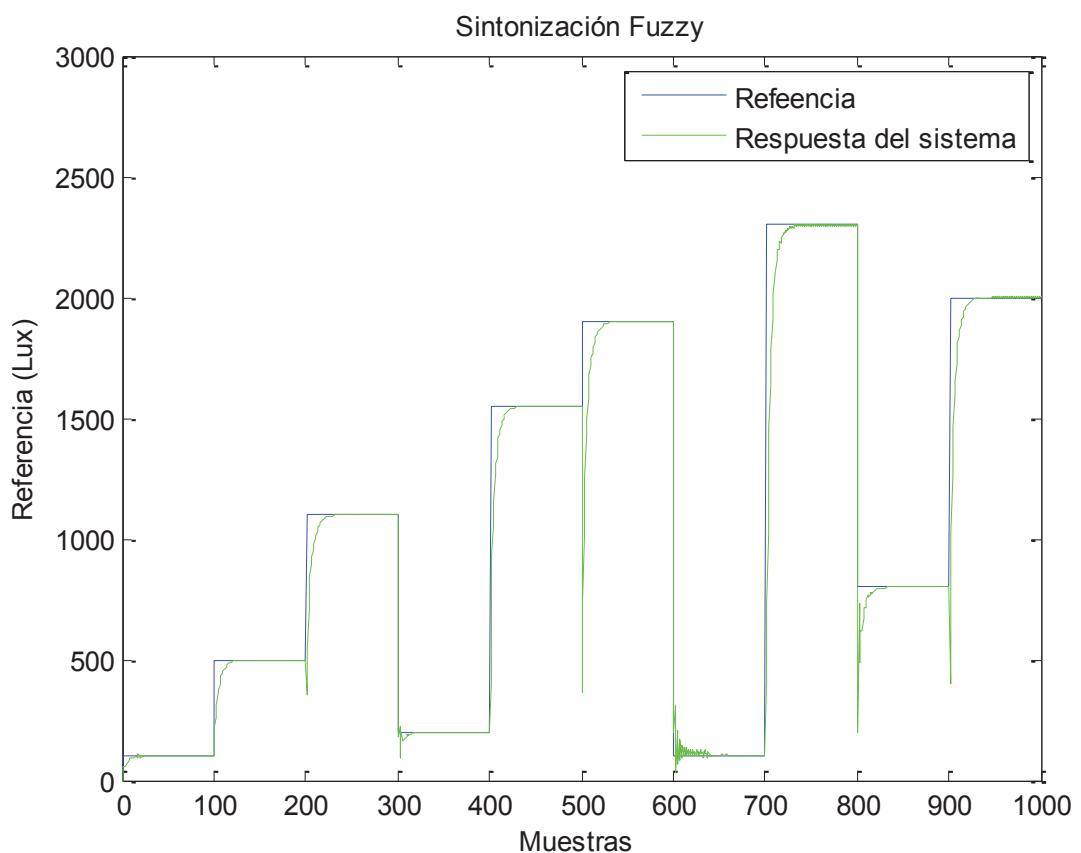


Figura 3.22. Sintonización de control difuso.

## 3.5 Redes neuronales

### 3.5.1 Diagrama general de red neuronal

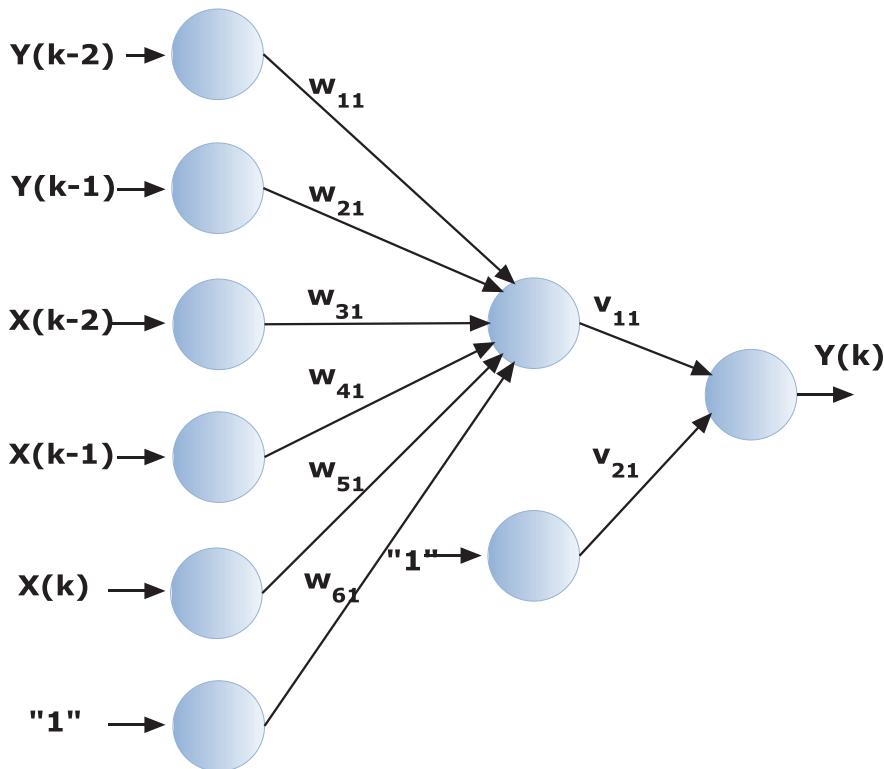


Figura 3.23. Diagrama de la red neuronal utilizada como control del sistema.

En la Figura 3.23 se muestra el esquema de la red neuronal utilizada para poder controlar la iluminación dentro del fitotrón la cual tiene 5 neuronas de entrada más el bias, contiene una capa oculta la cual sólo tiene dos neuronas una de las cuales corresponde al bias y en la salida se utiliza una neurona la cual corresponde a la única salida que se desea. Esta red es semejante a un filtro IRR en donde se utilizan como entrada tres muestras de la lectura obtenida por los sensores y dos muestras anteriores de salidas de la red neuronal.

### 3.5.2 Función de excitación

En la Figura 3.24 se muestra la estructura utilizada para obtener la función de excitación de las neuronas de la capa oculta y de salida. Para realizar la operación de multiplicaciones y sumas se utiliza una MAC y a su salida se obtiene el resultado de todas las operaciones que se necesitan.

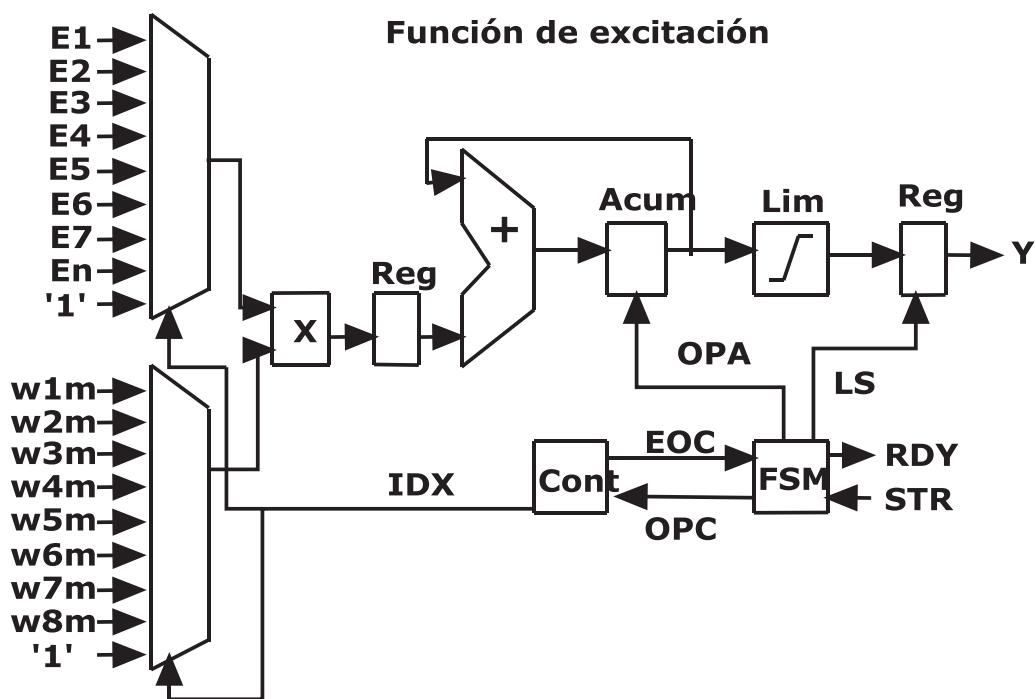


Figura 3.24. Estructura de función de excitación de la red neuronal.

### 3.5.3 Estructura general de red neuronal

En la Figura 3.25 se muestra la estructura general de total la red neuronal utilizada. En esta estructura se utilizó la función de excitación ya mencionada y como resultado de la función de activación se utilizó el mismo obtenido por la función de excitación.

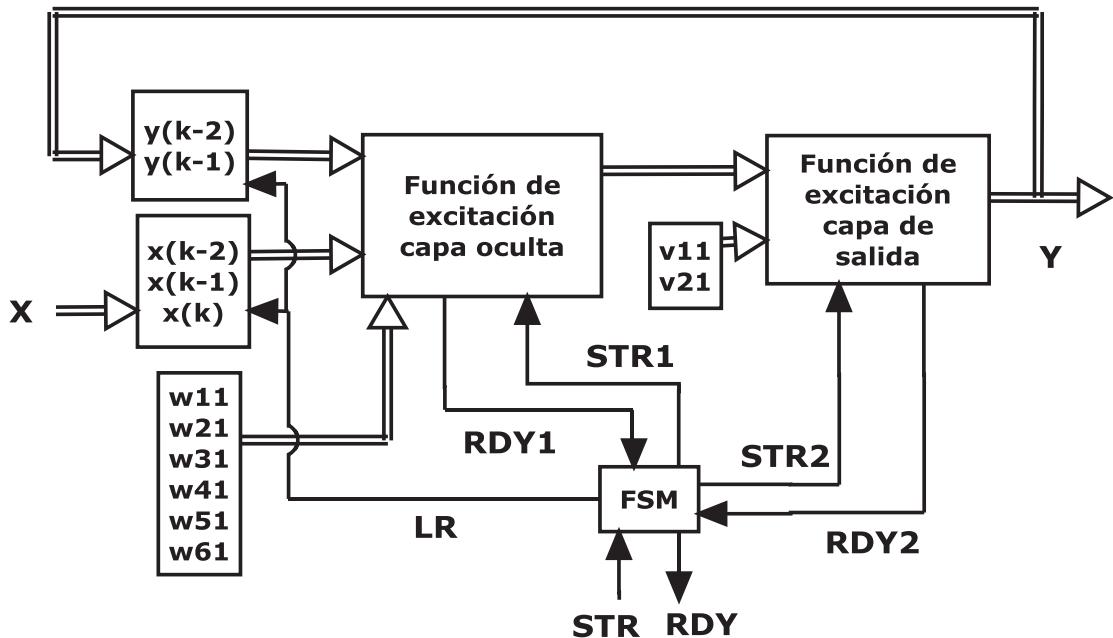


Figura 3.25. Estructura general de la red neuronal utilizada como control del sistema de iluminación.

### 3.5.4 Entrenamiento de red neuronal

En la Figura 3.26 se muestran los resultados del entrenamiento de la red neuronal. Para lograr el entrenamiento se establecieron diferentes referencias las cuales regulaban el PWM que controla las lámparas atenuables y se obtienen los datos proporcionados por el sensor, todo esto se realizó sin algún tipo de controlador. Después de tener los datos, se obtuvo el error entre la referencia fijada y el valor proporcionado por el sensor para que de este modo al tener los datos del error se utilizó este para el entrenamiento de la red. Para obtener los resultados del entrenamiento de la red, se desarrolló un programa en MatLab y se utilizó el método de retropropagación para el entrenamiento de la red. Los valores de los pesos obtenidos después del entrenamiento se muestran en la Tabla 3.2. Pesos de red neuronal

Tabla 3.2. Pesos de red neuronal

Pesos	Valores
W11	1.1759
W21	1.1725
W31	-0.3657
W41	0.4366
W51	0.5962
W61	0.2828
V11	0.4392
V21	-0.1209

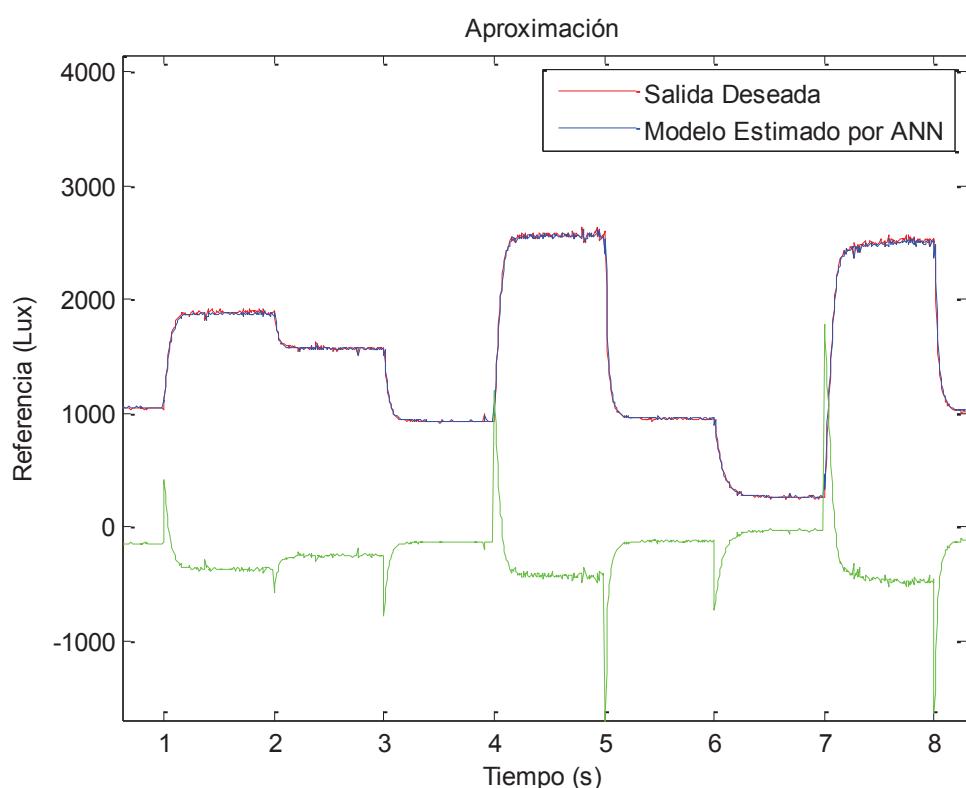


Figura 3.26. Gráfica de entrenamiento de la red neuronal.

### 3.6 Red de Petri.

La red de Petri utilizada para activar las lámparas fluorescentes se muestra en la Figura 3.27. Esta red de petri tiene a la entrada el error del sistema y en base a las condiciones establecidas para la activación de las lámparas, se ejecuta cierta transición y se llega al lugar correspondiente a la transición activada. Dentro de las condiciones para que se active cierta salida de la red de petri, es que el controlador de las lámparas atenuables proporcione la máxima salida y que la salida del sistema todavía no alcance la referencia. Dependiendo de qué tan grande sea el error se activan ciertas salidas de la red y de igual manera para que se desactiven las salidas es necesario que el control de las lámparas atenuable proporcione una salida cero y que la salida del sistema sea mayor a la referencia.

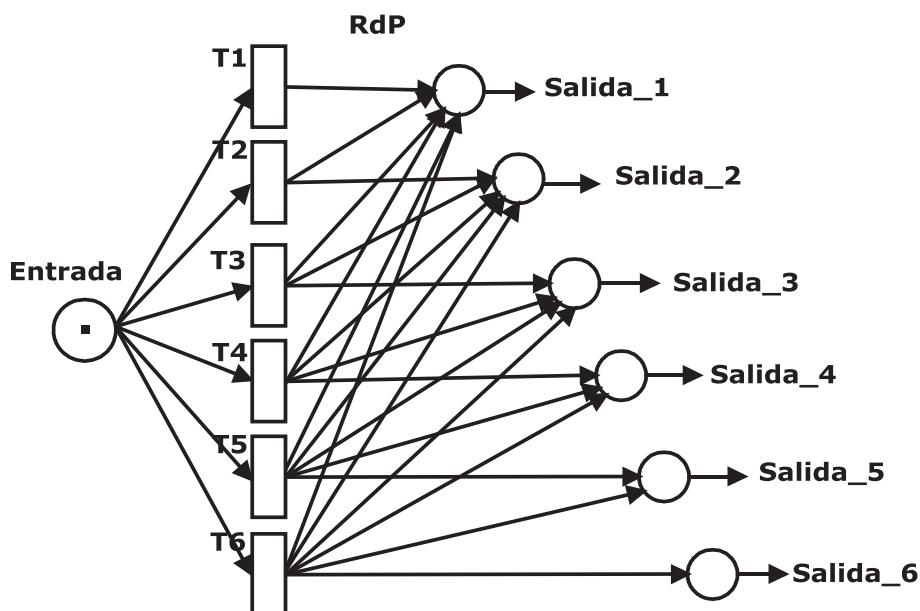


Figura 3.27. Diagrama general de la red de petri.

## RESULTADOS

---

En la Figura 4.1 se muestra la gráfica de la respuesta del sistema de iluminación utilizando un controlador PI-RdP y estableciendo diferentes referencias. De este modo, se puede observar que el sistema trata de llegar a la referencia y en algunos casos en donde existen perturbaciones, el controlador utilizado trata de minimizar el error. La velocidad de corrección del error depende de los parámetros utilizados en la sintonización.

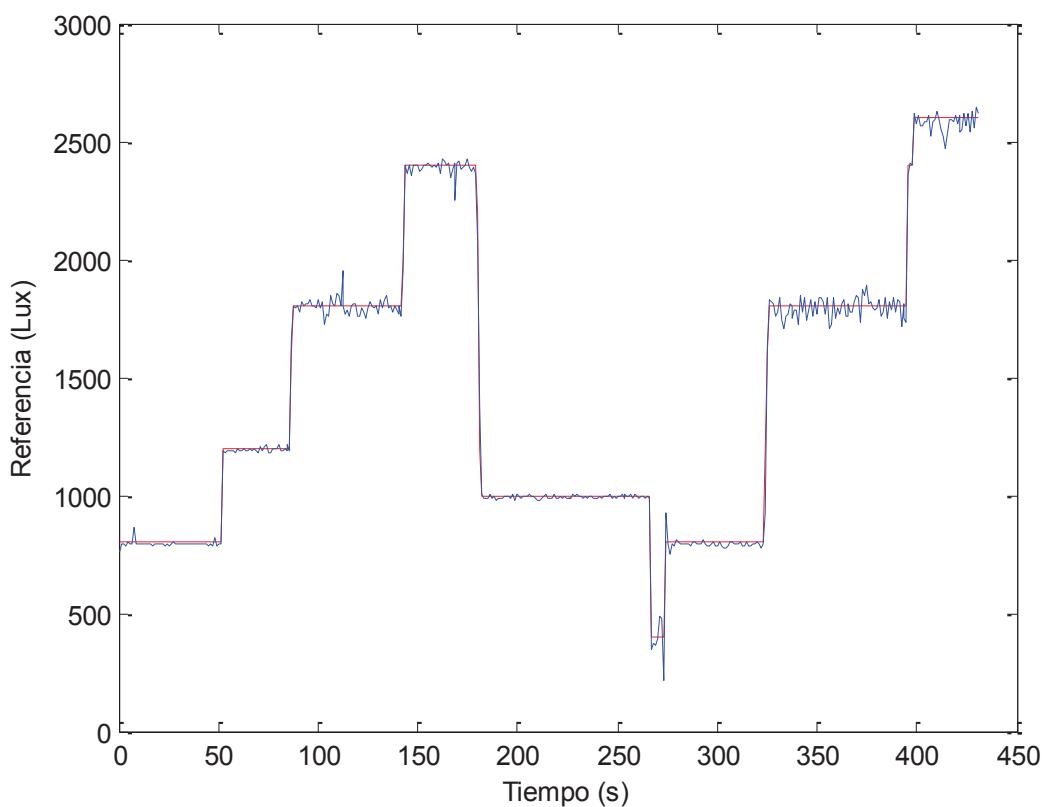


Figura 4.1. Respuesta del sistema de control PI-RdP ante diferentes referencias.

En la Figura 4.2 se muestran los resultados del sistema de control al utilizar un control difuso en combinación con una red de petri. Al igual que en el caso del control PI, se establecieron diferentes referencias para observar el comportamiento del sistema con una técnica diferente de control. Como se observa

en la gráfica, el sistema de iluminación tiene un mejor desempeño ya que la corrección del error es más rápido comparado con el controlador PI.

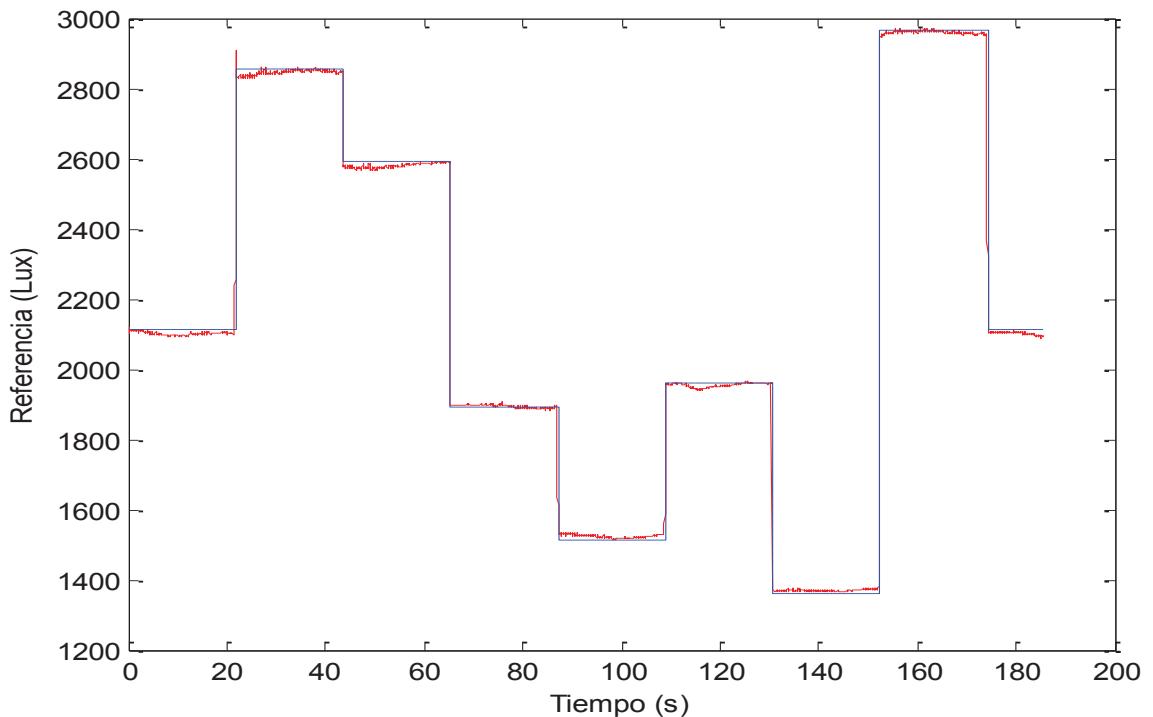


Figura 4.2. Respuesta del sistema de control difuso-RdP con diferentes referencias.

En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento del sistema de control neuronal-RdP de iluminación ante diferentes referencias. Al igual que las técnicas de control utilizadas anteriormente, se fijaron diferentes referencias para observar el comportamiento del sistema de control para alcanzar la referencia establecida. De la gráfica mostrada a continuación, se observa que el comportamiento del sistema tiene mayores oscilaciones comparado con el control difuso ya que la corrección del error depende del tiempo de respuesta del sistema, ya que el entrenamiento se realizó basándose en el comportamiento del sistema ante diferentes referencias.

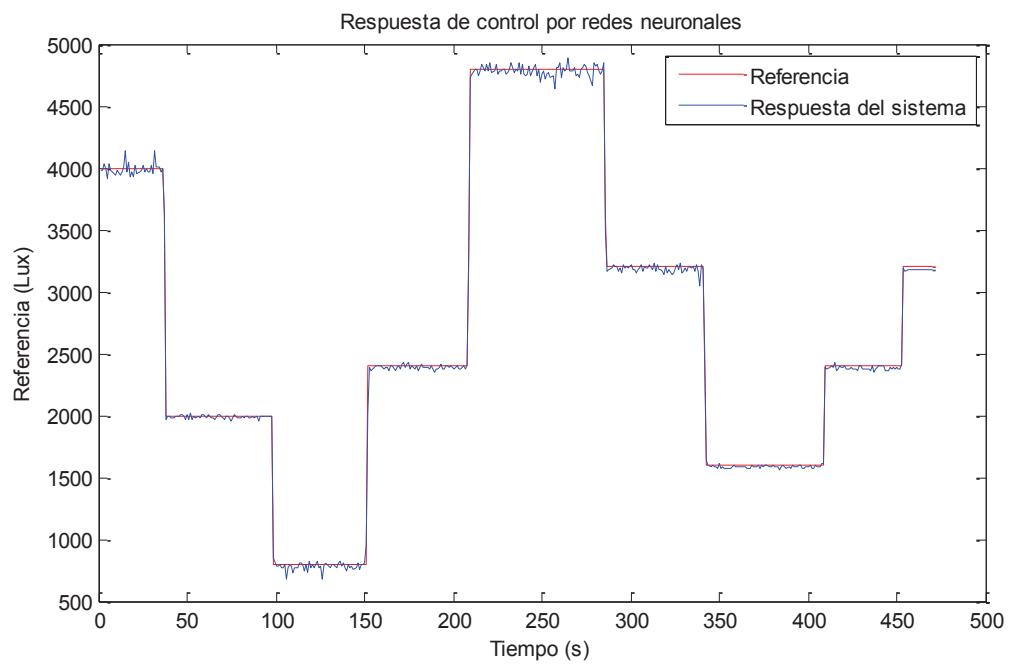


Figura 4.3. Respuesta del sistema de control de redes neuronales en conjunto con una red de petri.

## CONCLUSIONES

---

La iluminación es una variable importante en el fitotrópico por lo que es necesario que el sistema alcance la referencia con un error mínimo. De acuerdo a los resultados de los experimentos propuestos, se observa en las gráficas de resultados del control PI que el sistema alcanzó la referencia aunque tiene pequeñas oscilaciones y esto puede ser debido a que existe ruido que puede afectar en la medición de los sensores como puede ser un cambio en la temperatura en donde se encuentran los sensores ya que las lámparas generan calor. Para que el sistema de iluminación dentro del fitotrópico tenga un mejor desempeño se debe realizar una adecuada sintonización de la planta del sistema, una calibración adecuada de los sensores y un diseño adecuado del hardware del controlador.

Por otra parte, al observar el comportamiento del sistema utilizando un control difuso, la respuesta del sistema tiene un mejor comportamiento ya que la corrección del error se hace de manera más rápida comparado con el control PI en donde la velocidad de corrección del error depende de los parámetros de sintonización del mismo aunque para que el control difuso responda adecuadamente se debe sintonizar de la misma manera ya que su comportamiento depende de cómo se asignen las reglas de inferencia y como se definen los conjuntos de entrada y salida. Por otra parte al utilizar redes neuronales, el comportamiento del sistema tiene mayores oscilaciones ya que se diseñó la red de manera similar a un filtro y su comportamiento depende de los resultados del entrenamiento como se muestra en la figura correspondiente a la respuesta de la red neuronal en donde la corrección del error no es tan rápida como en el control difuso. De acuerdo con esto, la técnica de control que mejor desempeño tuvo durante las pruebas es el control difuso aunque las demás técnicas de control tienen un desempeño adecuado para ser utilizados dentro del fitotrópico ya que las variaciones en iluminación son pequeñas y no tienen un gran efecto en la reproducción de las plantas.

## REFERENCIAS

---

- Aguado Behar Alberto. 2000. Temas de identificación y control adaptable. Instituto de cibernetica, matemáticas y física.
- Allende H., Moraga C. y salas R. 2002. Artificial Neuronal Networks in Time Series Forecasting: A Comparative Analysis. *Kybernetika*, Volume 38, number 6, pages 685-707.
- Alvanitis K. G, Paraskevopoulos P. N., Vernardos A. A. 2001, multi rate adaptative temperature control of greenhouse.
- Benítez Pina Israel F., Pérez Ajo Pablo, Iglesias Rodríguez Narda, Milá Vega Juan C., Uribazo Arzuaga Ernesto, Reyes Hernández Jaime, Rojas Peña Leandro F., Villafruela Loperena Luisa, Cristóbal Suárez Raul, Fi Menéndez José. 1998. Automatización del fitotrófico. *Tecnología química* Vol. 18, Nos. 1 y 2. Universidad de Oriente, Instituto de Investigación Fundamental de la Agricultura Tropical, Habana.
- Boaventura Cunha J., Couto Carlos, A. E. B. 2000. Real time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse, environmental control, acta horticultura. Ruano.
- BramsG. W. 2005. Las redes de Petri: Teoría y práctica. Ed. Masson.
- El-Medany Wael M. 2008. "FPGA implementation for humidity and temperature remote sensing system," ims3tw, pp.1-4, 2008 IEEE 14th International Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop.
- Erenoglulsin, Eksinlbrahim, Yesil Engin, Guzelkaya Mujde. 2006. An intelligent hybrid fuzzy PID controller. Istanbul Technical University.
- Fan Xiaoping and Liu Yaowu. 2008. Alterable-Phase Fuzzy Control Based on Neuronal Network. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. Volume 8, Issue 1.
- García Escalante Juan José. 2004. Control climático de invernaderos basado en el modelo del cultivo y procesamiento de imágenes. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- García Águilar L., Gómez Kosky R., Albany N. R., Vilchez J. A., Alvarado Y., Reyes M. 2007. Influencia de las condiciones de iluminación en la

- germinación de embriones somáticos del cultivar híbrido de plátano (FHIA-21). Revista de Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia.
- Gómez Meléndez José. 2005. Control Fuzzy-PID aplicado a un sistema de riego localizado para invernaderos. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Hung T. Nguyen, Nadipuram R. Prasad, Carol L. Walker, Elbert A. Walker. 2003. A first Course in fuzzy and neuronal control .Ed. Chapman & Hall/CRC.
- KuoT. C., LinJ. S., Takeuchi Y., Huang Y. J. 2009. Intelligent Daylighth Panel control System based on Fuzzy Control for Green Building. Proceeding of the World Congress on Engineering Vol 1.
- Ley Manuel, Chacón Oscar L., Vázquez Ernesto. 2000. Control de voltaje de sistemas de potencia utilizando lógica difusa. Ingenierías, Enero-Marzo, Vol iii, No 6. FIME-UANL.
- Lozano Gutiérrez Carmen, Fuentes Martín Federico. 2004. Tratamiento borroso del intangible en la valoración de empresas en internet, universidad politécnica de Cartagena.
- Maroto J. V. 2008. Elementos de horticultura general. 3 edición. Grupo Mundiprensa. Editorial Andos.
- Martínez Reyes José Refugio. 2006. Diseño de un gestor de redes de Petri. Tesis maestría. Universidad de Colima.
- Martín José D. 2008. Implementación de Redes Neuro-Difusas para ser aplicadas en problemas de clasificación y modelización, Universal-Publishers.
- McCulloch W.S. and Pitts W. 1943. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: 115-133.
- Pasgianos, G. D, Arvanitis, K. G., Polycarpou, P. Sigrimis .2003. A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control, Department of electrical and computer engineering, national technical, university of Athens.
- Pallás Areny Ramón. 2003. Sensores y acondicionadores de señal, 4 edición, editorial marcombo.

- Rojas Molina Adriana. 2003. Control difuso para el sistema de riego de un invernadero. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Rojano Aguilar Fernando.2006. Identificación experimental del clima de un invernadero hidropónico. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Sulaiman F., Ahmad A., Kamarulzaman M. S. 2006. Automated Fuzzy Logic Light Balanced Control Algorithm Implemented in Passive Optical Fiber Daylighting System. AIML 06 Internacional Conference, 13-15, Sharm El sheikh, Egypt.
- Toledano Ayala Manuel. 2006. Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto para un invernadero. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Yoshito Kato, Hideo Kozuka, shigeruldo, Katsumi Nishimori. 2008. Study on lighting control of fluorescent lamp with fuzzy interference. Journal “Reports of the Faculty of Engineering, Tottori University”. **VOL.29;NO.1**.
- Zengqi Sun and Zhidog Deng. 1996. A fuzzy neuronal network and its application to control. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Artificial Intelligencein Engineering. Volume 10, Sisee 4.

## **Apéndice A**

### **Artículo publicado en congreso**

# **Controlador PI basado en FPGA aplicado al control de iluminación en fitotrópico**

## **PI controller based on FPGA applied to lighting control in phytotron**

**Edgar Francisco Duarte Ruiz<sup>2</sup>, Roque Alfredo Osornio Ríos<sup>1</sup>, Luis Alberto Morales Hernández<sup>1</sup>, Ramón Gerardo Guevara González<sup>1</sup>, Cesar Barrón Romero<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Profesores de la maestría en mecatrónica de la Universidad Autónoma de Querétaro, <sup>2</sup>Estudiante de la maestría en instrumentación y control automático de la Universidad Autónoma de Querétaro, <sup>3</sup>Estudiante de la maestría en mecatrónica de la Universidad Autónoma de Querétaro.

**RESUMEN.** En el presente trabajo se desarrolla un control de iluminación en un fitotrópico utilizando las leyes de control clásicas implementadas en FPGA, se muestran los pasos a seguir para instrumentar el fitotrópico, así como para lograr el control de una de las variables como es la iluminación. El sistema se prueba en un fitotrópico desarrollado en la Universidad Autónoma de Querétaro. Después se muestran los resultados obtenidos al dar como referencia de iluminación cuatro niveles diferentes.

**Palabras clave:** Fitotrópico, PI, Iluminación, FPGA.

### **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad es importante que las plantas se desarrolle en un menor tiempo para satisfacer las necesidades de la población ya que si no se da abasto con la producción del país, se recurre a la importación de vegetales para la alimentación de la sociedad, por esta razón se han implementado estructuras en donde se cultivan plantas con ambientes controlados, esto para tener una eficiencia mayor en el crecimiento de los vegetales. Al reducir el tiempo de reproducción de los vegetales se tiene una mayor producción de ellos en menor tiempo comparado con el cultivo que depende del medio ambiente para desarrollarse. La producción de plantas de cultivo es importante para las personas ya que contienen vitaminas que son importantes para la salud del cuerpo humano, además, las plantas que se cultivan en ambientes controlados son de mejor calidad beneficiando la exportación de ellas y así mejorar la economía del país. Por esta razón, los ambientes en donde se cultivan las plantas deben ser controlados con precisión para que sea más eficiente el proceso de cultivo y de una mayor calidad. Actualmente, los fitotrones son una herramienta donde se pueden estudiar a profundidad y en períodos más cortos de tiempo, la influencia de los principales factores climáticos en los procesos de crecimiento de las plantas, así como análisis de patógenos, al poder variar uno de los factores y mantener invariables los restantes. Estas investigaciones contribuyen significativamente a la elevación de la producción agrícola. Con su uso se logra acortar el tiempo de obtener el resultado de las investigaciones y ponerlas en práctica ya que en un solo año se pueden hacer varias siembras de verano mientras que, en la experimentación de campo, se requieren de varios años según las siembras necesarias para obtener los resultados de la investigación.

En la Universidad Autónoma de Querétaro se cuenta con una línea de investigación en biosistemas en donde se requieren equipos que permitan realizar investigaciones sobre la reproducción de plantas como es el caso de las cámaras de crecimiento también llamadas fitotrones. El problema de estos es que tienen altos costos, su control de las variables que influyen en la reproducción de plantas no cumple con los requerimientos necesarios, por esos se han desarrollado investigaciones para mejorar esas problemáticas. Dentro de los trabajos realizados se encuentra el monitoreo de invernaderos como es el caso de Rojas (2003) quien desarrolló un control difuso para el sistema de riego de un invernadero, en donde se monitoreaba la temperatura y humedad para determinar cuando era necesario suministrar agua a las plantas. Además, García (2004) desarrolló un control del clima de invernaderos realizando mediciones de la presión de vapor, la tasa de crecimiento del cultivo, el contenido de materia seca, la radiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento para, a partir de las mediciones obtenidas, encontrar una ecuación que relacione todas estas variables con el crecimiento del cultivo. Siguiendo la línea de investigación en invernaderos, Gómez (2005) desarrolló un control difuso-PID para un sistema de riego en un invernadero en donde se controlaba el nivel de nutrientes que recibían las plantas, realizando mediciones de pH y conductividad eléctrica para determinar el nivel de nutrientes que se proporcionan a las plantas de cultivo. Además, Toledano (2006) desarrolló un sistema de monitoreo remoto para invernadero en donde se monitorea la temperatura exterior e interior,

y la humedad exterior e interior del invernadero a través de la red inalámbrica en donde se grafican los datos obtenidos para observar el comportamiento de las variables medidas. En el ámbito internacional haciendo referencia al dispositivo en donde se implementará el sistema de control de iluminación, se han realizado sistemas de control usando un FPGA (*Fielde Programmable Gate Array*, arreglo de compuertas programables en campo) para implementar el sistema de control, este es el caso de El-Medany (2008) quien implementó un sistema de sensado para humedad y temperatura, haciendo uso de VHDL para describir el circuito, para que el costo del sistema de control sea bajo. También, Sulaiman et al. (2006) desarrollaron un sistema de control basado en lógica difusa para mejorar la eficiencia de la iluminación y así disminuir el consumo de energía necesaria para iluminar una habitación. Para esto implementaron el control difuso en un PIC y al estar comunicado con un software, se controlaba la iluminación para que fuera constante. También, se han desarrollado investigaciones sobre la importancia de la iluminación en el desarrollo de plantas como es el caso de García et al. (2007) quienes realizaron un estudio sobre la influencia de las condiciones de iluminación en la germinación de embriones somáticos para conocer los efectos de la luz en el desarrollo de las plantas. En la parte internacional referente a invernaderos se han desarrollado varios trabajos uno de ellos es Boaventura et al. (2000) quienes proponen la estimación de parámetros en tiempo real para un modelo lineal. La investigación se realiza en un invernadero para fines experimentales, donde el objetivo es calcular los parámetros de la estructura de un modelo de caja negra en línea para estimar la temperatura dentro del invernadero. Además, Arvanitis et al. (2000) consideran un sistema para ejercer acciones de calentamiento. El sistema está enfocado a estimar un balance de energía, considerando la capacidad térmica del invernadero y un factor de pérdida de calor. Por otra parte, Pasgianos et al. (2003) desarrollaron un sistema desacoplado para temperatura y humedad. Consideran que al ser lineal el modelo del sistema, permitirá una mayor facilidad de aplicación y suficiente aproximación a datos experimentales. Por otro lado, se han desarrollado investigaciones sobre sistemas de control de iluminación en invernaderos como es el caso de Kuo et al. (2009) quienes desarrollaron un control inteligente de iluminación para ser utilizado en invernaderos. Este control está basado en lógica difusa, el objetivo del control era regular, de forma automática, la luz solar de manera eficiente y así mejorar la calidad de la iluminación interior, reduciendo la necesidad de luz artificial. En el ámbito de la automatización de un fitotrópico. Benítez et al. (1998) automatizaron tres fitotrones utilizando un PLC para regular los parámetros de iluminación, temperatura, humedad y riego, la iluminación sólo tenía doce niveles diferentes de iluminación. Esto se desarrolló para disminuir el costo energético que requería el fitotrópico antes de ser automatizado.

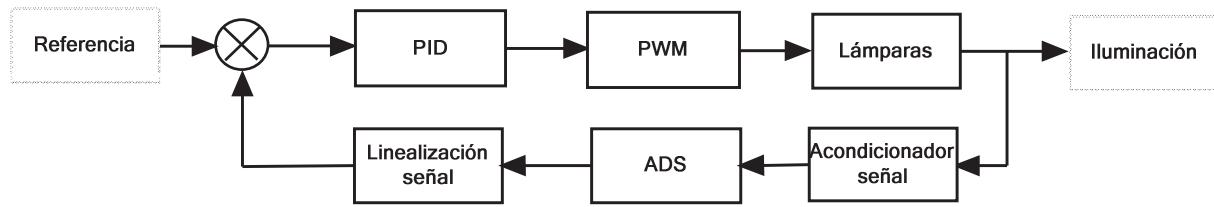
Una de las variables importantes en la reproducción adecuada de las plantas es la iluminación, ya que influye en el proceso de fotosíntesis de las plantas, por lo que al tener una iluminación adecuada en el fitotrópico hará que la planta se desarrolle más eficientemente, lo cual reduce el tiempo necesario para que un tipo de planta esté listo para ser comercializada y esto incrementa los ingresos de la persona que la está cultivando, lo que reduce el costo final de cada planta ya que se puede realizar una mayor producción de plantas con el mismo costo comparado si la iluminación no fuera eficiente. Si el nivel de iluminación varía un poco, se afecta el proceso de crecimiento de la planta. Por otra parte, al estar variando la intensidad luminosa de las lámparas, su tiempo de vida se reduce, por lo que ocasionaría costos mayores al tener que reemplazar las lámparas en un periodo más corto. También, al no crecer las plantas en el tiempo esperado, ocasiona más gastos debido a que se deben invertir más recursos para una determinada cantidad de plantas. Por otra parte, al ser eficiente el sistema de control de iluminación, el consumo de energía se reduce lo que beneficia la economía de la persona que cultiva la planta, además, de que beneficia al medio ambiente al reducir el consumo de energía eléctrica, lo que implica que se aprovechen mejor los recursos usados para la generación de la misma.

De acuerdo con las necesidades de los investigadores de biosistemas, el presente trabajo tomará en cuenta una de las variables que influyen en la reproducción de plantas como es la iluminación. El sistema de iluminación se implementará, junto con otros sistemas de variables necesarias para el crecimiento de plantas como es la temperatura y humedad, para crear un fitotrópico. El sistema de iluminación que se presenta en este trabajo, es la instrumentación y control clásico de iluminación para cumplir los requerimientos de iluminación de las plantas.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. Sistema de control de iluminación

En la figura 1 se muestra un diagrama a bloques de los elementos que constituyen el sistema de control de iluminación utilizado en el fitotrópico.



**Figura 1. Diagrama a bloques de sistema de control de iluminación.**

El sistema de control de iluminación se encuentra implementado en un FPGA, tanto el controlador PID (*Proportional-Integral-derivative*, Proporcional-Integral-Derivativo), como el PWM (*Pulse-Width Modulation*, Modulación por ancho de pulsos) y la linealización de la señal de iluminación la cual se acondicionó de tal manera que fuera equivalente a la referencia que se envía desde una PC. Se realizó la linealización de la señal de forma digital ya que la señal obtenida después del acondicionamiento no se comporta de forma lineal lo que hacía que esa señal no se relacionara directamente con la referencia. Para esto se caracterizó la señal obtenida del acondicionamiento y se obtuvo una ecuación que relacionaba la información de retroalimentación con la referencia para así poder comparar la señal de referencia con la señal de salida del sistema. El PWM controla tanto lámparas fluorescentes como incandescentes.

## 2.2. Sensor de iluminación

Pallás (2003) establece que las fotorresistencias o fotoconductores (LDR, *Light Dependent Resistors*) se basan en la variación de la resistencia eléctrica de un semiconductor al incidir en él radiación óptima (radiación electromagnética con longitud de onda entre 1mm y 10 nm). La conductividad eléctrica en un material depende del número de portadores en la banda de conducción. En un semiconductor, a baja temperatura la mayor parte de sus electrones están en la banda de valencia, y se comporta casi como aislante. Pero al aumentar la temperatura, y con ella la agitación los electrones, dado que las bandas de valencia y de conducción están próximas, cada vez hay más electrones que saltan de la banda de valencia a la conducción, aumentando la conductividad. Si el semiconductor está dopado, este salto es aún más fácil. La energía necesaria para producir el salto puede venir de otras fuentes externas de calor, como puede ser una radiación óptica o una tensión eléctrica. En el caso de la radiación óptica, su energía  $E$ , y frecuencia  $f$ , están relacionadas mediante la expresión:

$$E = hf \quad (2.1)$$

Donde:

$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Ws}^2$  es la constante de Plack.

Entonces si la radiación tiene energía suficiente para permitir el salto de los electrones de una a otra banda, pero si excede el umbral necesario para que se desprendan del material, se tendrá efecto fotoeléctrico interno o fotoconductor, y a mayor iluminación mayor será la conductividad. Si se excede dicho umbral, se tendrá efecto fotoeléctrico externo.

## 2.3. PWM

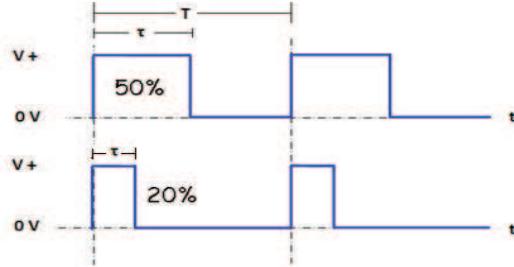
Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (2.2)$$

Donde:

$D$  es el ciclo de trabajo

$\tau$  es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)  
 $T$  es el período de la función



**Figura 2. Modulador de Ancho de Pulso**

La construcción típica de un circuito PWM se lleva a cabo mediante un comparador con dos entradas y una salida. Una de las entradas se conecta a un oscilador de onda triangular, mientras que la otra queda disponible para la señal moduladora. En la salida, la frecuencia es generalmente igual a la de la señal triangular, y el ciclo de trabajo está en función de la portadora.

#### 2.4. Función de transferencia pulso de un controlador digital

La función de transferencia pulso de un controlador digital se puede obtener a partir de las características entrada-salida requerida del controlador digital. Si se considera que la entrada al controlador digital es  $e(k)$  y la salida es  $m(k)$ , la salida  $m(k)$  puede estar dada mediante la siguiente ecuación en diferencias:

$$\begin{aligned} m(k) + a_1m(k-1) + a_2m(k-2) + \dots + a_nm(k-n) \\ = b_0e(k) + b_1e(k-1) + \dots + b_ne(k-n) \end{aligned} \quad (2.3)$$

La transformada z de la ecuación 2.3 da como resultado

$$\begin{aligned} M(z) + a_1z^{-1}M(z) + a_2z^{-2}M(z) + \dots + a_nz^{-n}M(z) \\ = b_0E(z) + b_1z^{-1}E(z) + \dots + b_nz^{-n}E(z) \end{aligned} \quad (2.4)$$

La función de transferencia pulso  $G_D(z)$  del controlador digital es dada como:

$$G_D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (2.5)$$

#### 2.5. Función de transferencia pulso de un controlador PID digital.

El principio básico del esquema de control PID es que actúa sobre la variable a ser manipulada a través de una apropiada combinación de las tres acciones de control: acción de control proporcional (donde la acción de control es proporcional a la señal de error actuante, la cual es la diferencia entre la entrada y la señal de retroalimentación); acción de control integral (donde la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error actuante) y la acción de control derivativa (donde la acción de control es proporcional a la derivada de la señal de error actuante).

La acción de control PID en controladores analógicos está dada por:

$$m(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.6)$$

En donde  $e(t)$  es la entrada al controlador (señal de error actuante),  $m(t)$  es la salida del controlador (la señal manipulada),  $K$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es el tiempo integral (o tiempo de ajuste) y  $T_d$  es el tiempo derivativo (o tiempo de adelanto).

Para obtener la función de transferencia pulso del controlador PID digital, se puede discretizar la ecuación 2.6. Al aproximar el término integral mediante la sumatoria trapezoidal y el término derivativo mediante la diferencia de dos puntos, se obtiene

$$m(kT) = K \left\{ e(KT) + \frac{T}{T_i} \left[ \frac{e(0) + e(T)}{2} + \frac{e(T) + e(2T)}{2} + \dots + \frac{e((k-1)T) + e(kT)}{2} \right] \right\} \\ + T_d \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \quad (2.7)$$

La transformada z de la ecuación 2.7 da como resultado

$$M(z) = K \left[ 1 + \frac{T}{2T_i} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right] E(z) \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 se puede escribir como sigue:

$$M(z) = K \left[ 1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1-z^{-1}) \right] E(z) \\ = \left[ K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_D (1-z^{-1}) \right] E(z) \quad (2.9)$$

Donde

Ganancia proporcional

$$K_p = K - \frac{KT}{2T_i} = K - \frac{K_i}{2}$$

Ganancia integral

$$K_i = \frac{KT}{T_i}$$

Ganancia derivativa

$$K_D = \frac{KT_d}{T}$$

## 2.6. Lámparas incandescentes.

Las lámparas incandescentes emiten radiación solar cuando se calienta un filamento de tungsteno o wolframio situado en su interior, por efecto del paso de corriente eléctrica por él. Para impedir que se queme el filamento, en el interior de la lámpara se hace el vacío o se llena con algún tipo de gas inerte. Se fabrica una gran variedad de formas y con diferentes tamaños de casquillo, colores y distintas formas. Se puede encontrar en el mercado lámparas de 25, 40, 60, 100 W. Lámparas con forma de vela, globo, lámparas reflectoras, con casquillo de rosca E14 (casquillo delgado), E27 (casquillo convencional) o E40 (casquillo de lámparas de 300 W).

## 2.7. Lámparas fluorescentes.

Son lámparas cuyo funcionamiento se basa en la emisión de radiación ultravioleta por átomos de mercurio a baja presión situados en el tubo o lámpara. La atmósfera interna de las lámparas fluorescentes es una combinación de un gas inerte, como el argón, y una pequeña cantidad de mercurio, que inicialmente se encuentra en estado líquido. La radiación ultravioleta se convierte en radiación visible gracias a la sustancia fluorescente que poseen las paredes de la lámpara. Esta sustancia es la que determina el rendimiento de la lámpara y el color de la luz emitida. Se tiene borato

de cadmio (color rosa claro), silicato de cinc y berilio (color amarillo-verdoso), tungsteno de magnesio (color azulado). El encendido de la lámpara se produce mediante un impulso de tensión que ioniza el mercurio. El equipo de encendido de un tubo fluorescente convencional suele estar formado por una reactancia y un cebador. También es posible el encendido mediante reactancias electrónicas y existen tubos especiales de cátodo frío y lámparas fluorescentes de bajo consumo con rosca convencional (E14 y E27) que no requieren ningún equipo externo.

### 3. DESARROLLO

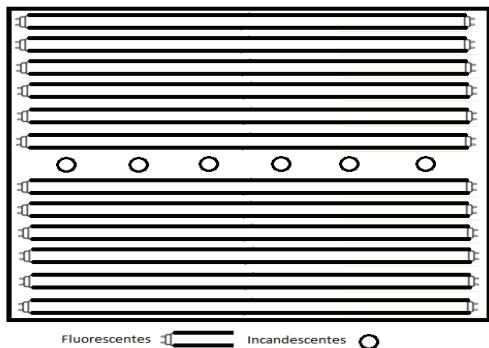
Este proyecto consta de varias etapas, la primera es la instrumentación del fitotrópico ya que se contaba con un prototipo de la cámara de crecimiento la cual se muestra en la figura 3, pero este era solamente una carcasa, así que para llevar a cabo el sistema de control de iluminación se instalaron las lámparas, los actuadores. Sensores y la tarjeta en donde se implementó el controlador. La segunda etapa fue el desarrollo de la tarjeta de potencia de las lámparas y acondicionamiento de señal del sensor, la tercera etapa fue la implementación en hardware del controlador y la cuarta etapa fue la experimentación. Cada una de las etapas se detalla más adelante. En la figura 4 se muestra el prototipo de fitotrópico utilizado. Las dimensiones son: exterior altura=1.86 m, largo=2.03 m, ancho= 0.86m. Interior altura=1.7 m, largo=1.1 m y ancho=0.7 m.



**Figura 3. Prototipo de fitotrópico**

#### 3.1 Instrumentación de fitotrópico

En la figura 4 se muestra la distribución de las lámparas y en la figura 5 se muestran las lámparas colocadas dentro del fitotrópico. Las lámparas que se utilizaron son incandescentes y fluorescentes, como ya se mencionó, se utilizaron este tipo de lámparas para la regulación de iluminación (incandescente) y para disminuir el calor emitido por las lámparas y hacer más eficiente el consumo de energía eléctrica (fluorescentes). Las lámparas incandescentes que se utilizaron son 6 lámparas incandescentes de 60 W bellalux, soft azul de la marca OSRAM, esta lámpara se seleccionó porque al tener el cristal blanco, emite luz menos amarilla la cual beneficia a las plantas. Las lámparas fluorescentes que se utilizaron 12 lámparas fluorescentes de 110W, arranque rápido F48T12/CW/1500 de la marca GE Lighting las cuales proporcionan una iluminación de 6200 lúmenes iniciales y 4030 lúmenes medios.



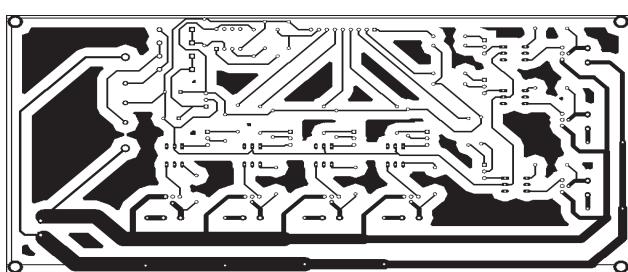
**Figura 4. Distribución de lámparas**



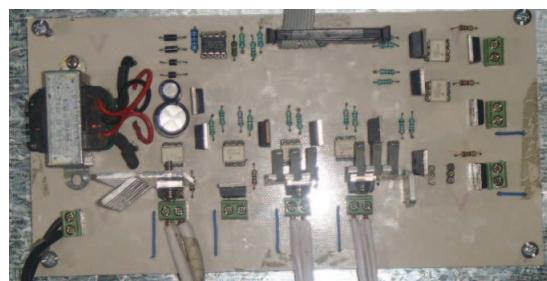
**Figura 5. Distribución de lámparas dentro de fitotrón**

### 3.2 Tarjeta de potencia.

Como se utilizó para implementar el hardware del sistema de control una tarjeta de desarrollo FPGA, las señales de control requieren una etapa de potencia para poder ser utilizadas en los actuadores que controlan el encendido de las lámparas, se desarrolló la tarjeta mostrada en la figura 6 que corresponde al diseño PCB de la tarjeta y la figura 7 que corresponde a la tarjeta físicamente.



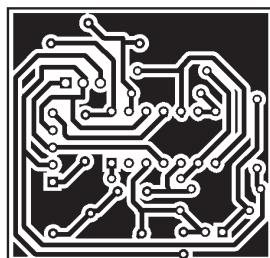
**Figura 6. Diseño PCB de tarjeta de potencia**



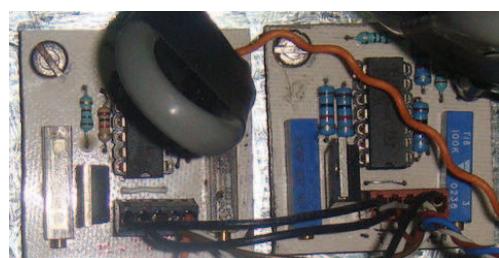
**Figura 7. Tarjeta de potencia**

### 3.3 Tarjeta de sensores.

La señal que proporcionan los sensores debe ser acondicionada a una señal equivalentes al sistema de control digital, por ello se desarrolló la tarjeta mostrada en la figura 8 que corresponde al diseño PCB de la tarjeta del sensor y que se muestra físicamente en la figura 9. Para este proyecto se utilizó como sensor de iluminación dos LDR VT90N1 de la marca PerkinElmer optoelectronics.



**Figura 8. Diseño PCB de tarjeta de sensor**



**Figura 9. Tarjeta de sensor**

### **3.4 Tarjeta de desarrollo FPGA**

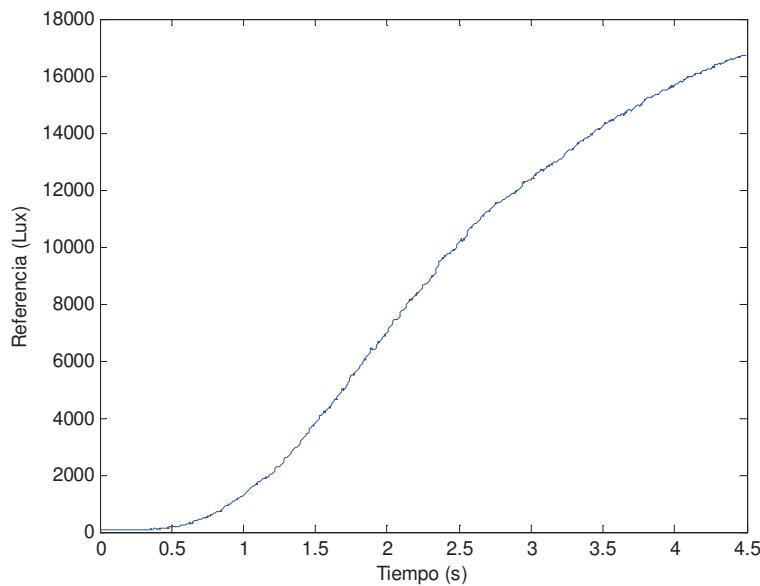
La tarjeta de desarrollo FPGA utilizada para implementar el controlador digital es una tarjeta desarrollada en la UAQ por HSP, Cuerpo académico Mecatrónica. Esta tarjeta tiene un FPGA Spartan 3E de 1600000 compuertas, 8 salidas analógicas de  $\pm 10V$ , 8 entradas analógicas, 16 entradas digitales TTL, 16 salidas digitales TTL, 3 DIP switch, puerto RS232, puerto USB, memoria serial de 32KB, memoria estática de 512KB, memoria dinámica de 4MB, Oscilador de 48MHZ y configuración vía JTAG o de memoria flash.



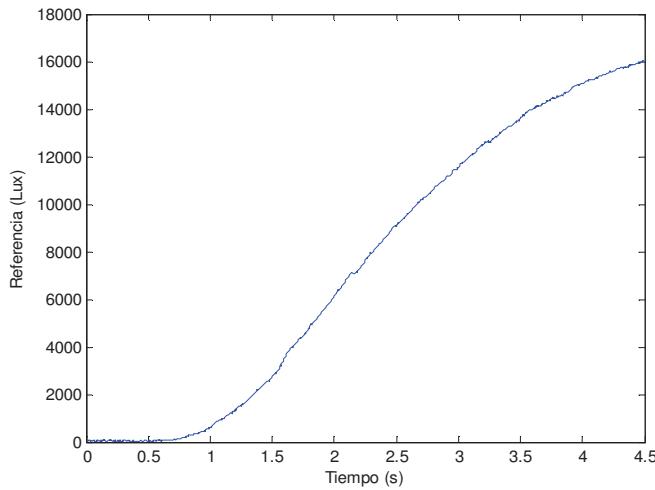
**Figura 10. Tarjeta de desarrollo FPGA**

### **3.5 Linealización del sensor**

Debido a que la respuesta del sensor no se comporta de manera lineal, fue necesario obtener una ecuación que de alguna manera nos relacionara la señal que nos proporciona el sensor con la referencia, debido a ello se obtuvo la respuesta del sensor ante una referencia que variaba de 0 a 17000 lux, es decir la referencia se incrementaba 1 lux cada 0.26 milisegundos y se obtuvieron las gráficas mostradas en la figura 10 que corresponde al sensor 1 y la figura 11 que corresponde al sensor 2.



**Figura 10. Gráfica de respuesta de sensor 1**



**Figura 11. Gráfica de respuesta de sensor 2**

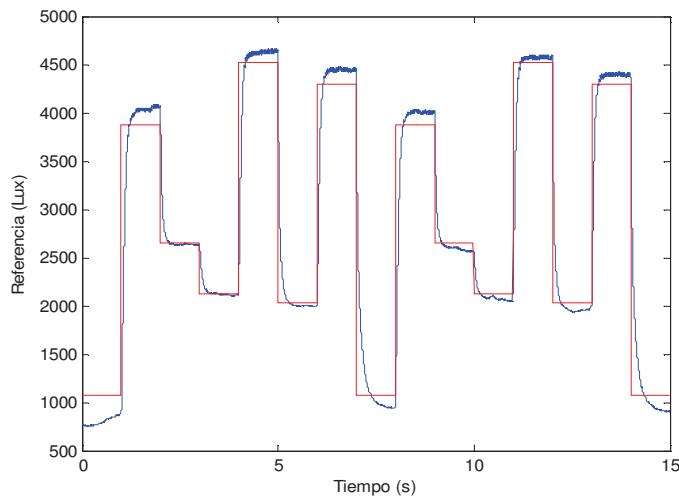
Mediante las gráficas mostradas anteriormente se approximó la respuesta del sensor a una función lineal, obteniendo las ecuaciones 3.1 que corresponde al sensor 1 y ecuación 3.2 que corresponde al sensor 2.

$$\text{Sensor 1} = 2.4329e^{-9}x^3 - 3.8494e^{-5}x^2 + 0.3775x + 629.20112 \quad (3.1)$$

$$\text{Sensor 2} = 2.2025e^{-9}x^3 - 3.5339e^{-5}x^2 + 0.3468x + 911.8882 \quad (3.2)$$

### 3.6 Sintonización de planta de sistema.

Al tener una relación entre la referencia y la señal del sensor, se puede adquirir la respuesta del sistema ante diferentes entradas de referencia con un error menor. La sintonización de la planta se realizó utilizando una aplicación de MATLAB que permite obtener la función de una serie de datos los cuales en este caso son los datos adquiridos de la respuesta del sistema. En la figura 12 se muestra la gráfica de la respuesta del sistema sin control ante diferentes referencias.



**Figura 12. Respuesta de sistema de iluminación sin control**

La función de transferencia obtenida de la planta es la mostrada en la ecuación 3.3.

$$G(s) = \frac{1.0382}{0.062659s + 1} \quad (3.3)$$

#### 4. EXPERIMENTACIÓN

Para probar el funcionamiento del sistema de control se realizaron cuatro pruebas, en donde se daba una referencia diferente en cada una de ellas. En la tabla 1 se muestran los experimentos realizados.

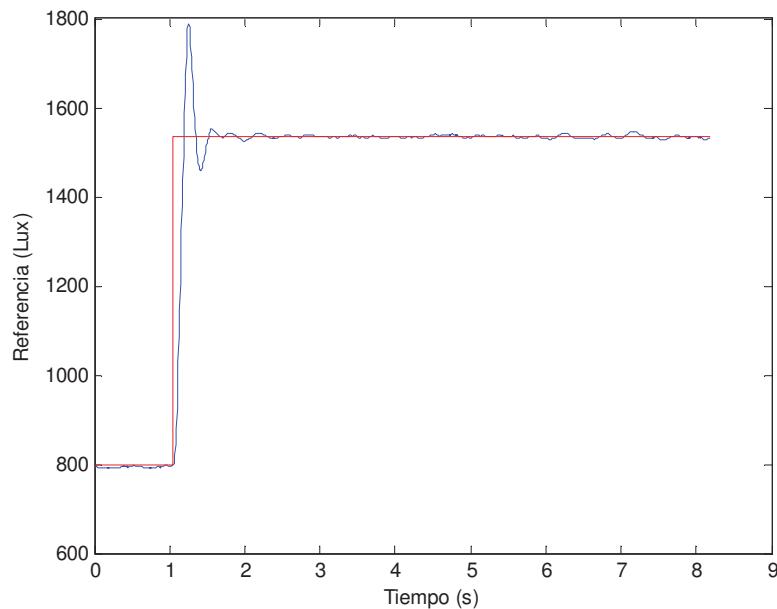
**Tabla 1. Experimentos realizados**

Experimento	Referencia (Lux)
1	1530
2	2300
3	4100
4	6650

De acuerdo a la referencia dada en cada experimento mostrado en la tabla 1, se obtiene una gráfica del comportamiento del sistema de control de iluminación.

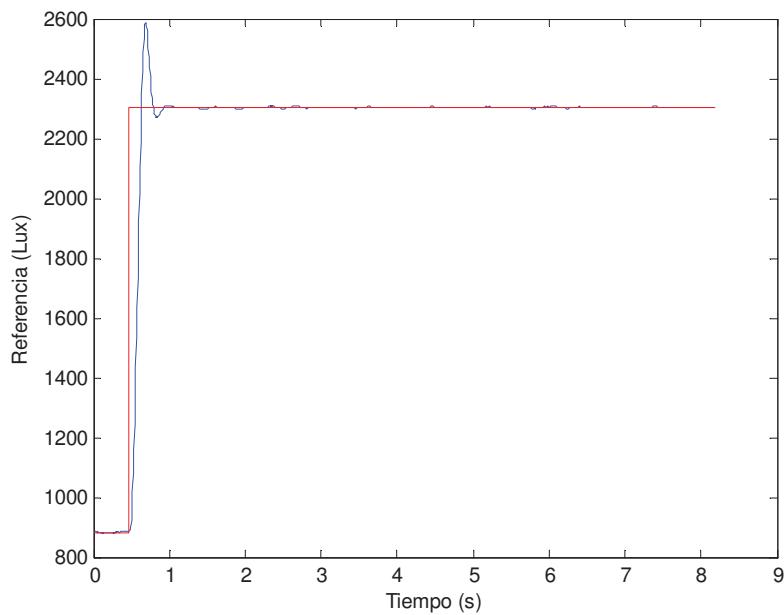
#### 5. RESULTADOS

En la figura 13 se muestra el comportamiento del sistema de iluminación al dar una referencia de 1530 lux (Gráfica roja).



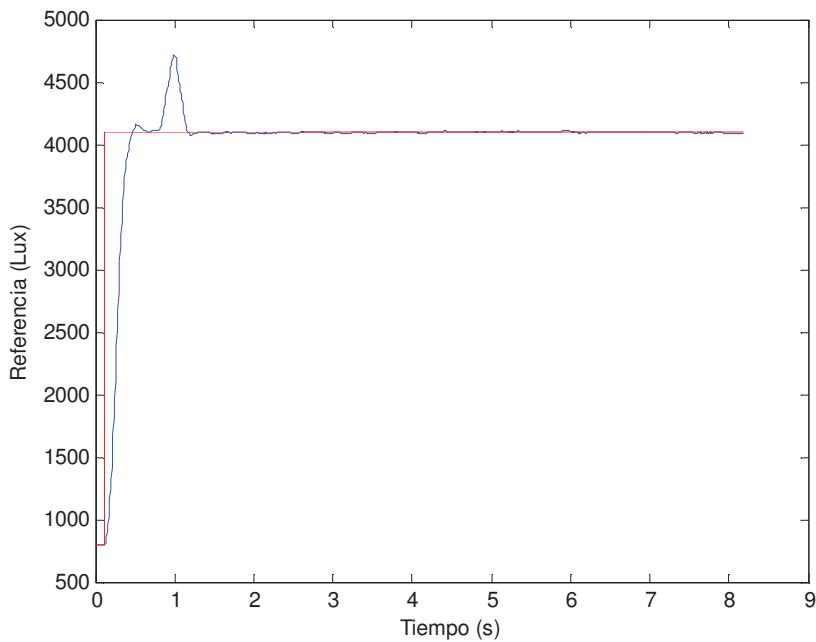
**Figura 13. Respuesta de sistema de control con referencia de 1530 lux**

En la figura 14 se muestra el comportamiento del sistema de iluminación al dar una referencia de 2300 lux (Gráfica roja).



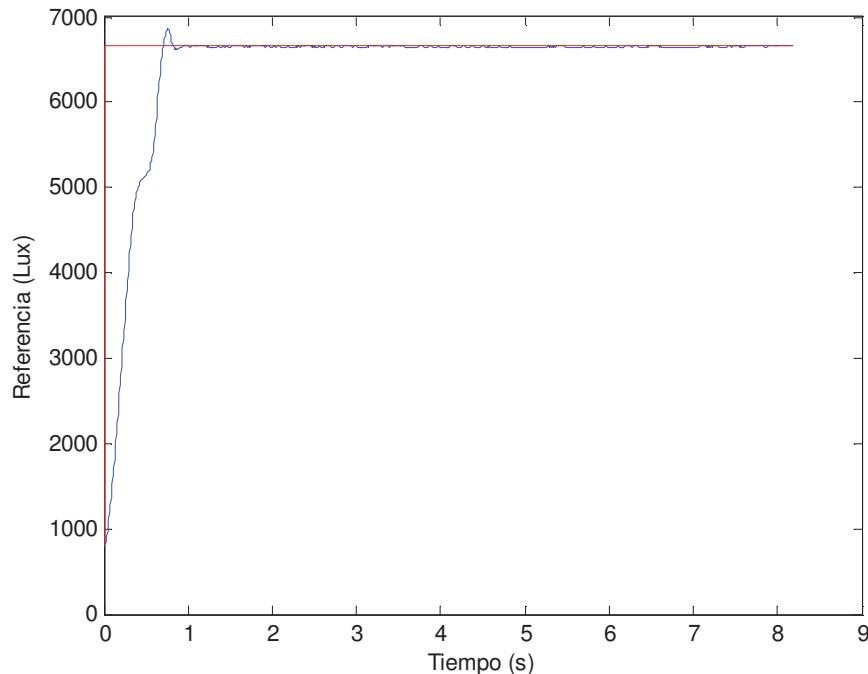
**Figura 14. Respuesta de sistema de control con referencia de 2300 lux**

En la figura 15 se muestra el comportamiento del sistema de iluminación al dar una referencia de 4100 lux (Gráfica roja).



**Figura 15. Respuesta de sistema de control con referencia de 4100 lux**

En la figura 16 se muestra el comportamiento del sistema de iluminación al dar una referencia de 6650 lux (Gráfica roja).



**Figura 16. Respuesta de sistema de control con referencia de 6650 lux**

## 6. CONCLUSIONES

La iluminación es una variable importante en el fitotrópico por lo que es necesario que el sistema alcance la referencia con un error mínimo de acuerdo a los resultados de los experimentos propuestos, se observa en las gráficas de resultados que el sistema alcanzó la referencia aunque tiene pequeñas oscilaciones y esto puede ser debido a que existe ruido que puede afectar en la medición de los sensores como puede ser un cambio en la temperatura en donde se encuentran los sensores ya que las lámparas generan calor. En los resultados se observa que a bajas referencias de iluminación el sobre paso es mayor y esto puede ser debido a que el sensor en niveles bajos de iluminación, el cambio de la lectura es mayor con un pequeño cambio en la iluminación. Para que el sistema de iluminación dentro del fitotrópico tenga un mejor desempeño se debe realizar una adecuada sintonización de la planta del sistema, una calibración adecuada de los sensores y un diseño adecuado del hardware del controlador.

## 7. REFERENCIAS

- Alvanitis K. G, Paraskevopoulos P. N., Vernardos A. A. 2001, multirate adaptative temperature control of greenhouse.  
 Benítez Pina Israel F., Pérez Ajo Pablo, Iglesias Rodríguez Narda, Milá Vega Juan C., Uribazo Arzuaga Ernesto, Reyes Hernández Jaime, Rojas Peña Leandro F., Villafruela Loperena Luisa, Cristóbal Suárez Raul, Fi Menéndez José, 1998, Automatización del fitotrópico. Tecnología química Vol. 18, Nos. 1 y 2. Universidad de Oriente, Instituto de Investigación Fundamental de la Agricultura Tropical, Habana.  
 Boaventura Cunha J., Couto Carlos, 2000. Real time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse, environmental control, acta horticultura. Ruano .

- El-Medany Wael M., 2008, FPGA implementation for humidity and temperature remote sensing system," ims3tw, pp.1-4, 2008 IEEE 14th International Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop.
- García Escalante Juan José, 2004. Control climático de invernaderos basado en el modelo del cultivo y procesamiento de imágenes. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- García Águilar L., Gómez Kosky R., Albany N. R., Vilchez J. A., Alvarado Y., Reyes M., 2007. Influencia de las condiciones de iluminación en la germinación de embriones somáticos del cultivar híbrido de plátano (FHIA-21). Revista de Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia.
- Gómez Meléndez José, 2005. Control Fuzzy-PID aplicado a un sistema de riego localizado para invernaderos. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Kuo T. C., Lin J. S., Takeuchi Y., Huang Y. J., 2009. Intelligent Daylighth Panel control System based on Fuzzy Control for Green Building. Proceeding of the World Congress on Engineering. Vol 1.
- Maroto J. V. Elementos de horticultura general. 2008. 3 edición. Grupo Mundiprensa. Editorial Andos.
- Pasgianos, G. D, Arvanitis, K. G., Polycarpou, P. Sigrimis 2003, A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control, Department of electrical and computer engineering, national technical, university of Athens.
- Pallás Areñy Ramón, 2003. Sensores y acondicionadores de señal, 4 edición, editorial marcombo.
- Rojas Molina Adriana, 2003. Control difuso para el sistema de riego de un invernadero. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Rojano Aguilar Fernando, 2006. Identificación experimental del clima de un invernadero hidropónico. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Toledano Ayala Manuel, 2006. Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto para un invernadero. Tesis maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Yoshito Kato, Hideo Kozuka, shigeru Ido, Katsumi Nishimori, 2008. Study on lighting control of fluorescent lamp with fuzzy interference. Journal Reports of the Faculty of Engineering, Tottori University. VOL.29; NO.1.  
[http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-3636DTS\\_vt900seriesdatasheet.pdf](http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-3636DTS_vt900seriesdatasheet.pdf)  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n\\_por\\_ancho\\_de\\_pulsos](http://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n_por_ancho_de_pulsos)