

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“CONTROL LÓGICO DIFUSO DEL PÉNDULO
INVERTIDO”**

PROYECTO DE TESIS

**Que para obtener el Título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Presenta
LUIS ARTURO GALLEGOS ORTIZ**

**Asesor de Tesis
M. I. SALVADOR RAMIREZ ZAVALA**

**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Febrero del 2009**

RESUMEN

“CONTROL LÓGICO DIFUSO DEL PÉNDULO INVERTIDO”

Luis Arturo Gallegos Ortiz

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Asesor **M. I. SALVADOR RAMIREZ ZAVALA**

El objetivo del presente proyecto de tesis es desarrollar el algoritmo de control de un sistema no lineal muy conocido en el ámbito de control llamado “El péndulo invertido”. Se emplea un microcontrolador el cual será programado mediante algoritmos de lógica difusa.

El desarrollo del proyecto presenta una aplicación específica del uso de microcontroladores en la automatización de procesos con una técnica avanzada de control, como lo es la lógica difusa. El trabajo muestra una breve descripción sobre la teoría de la lógica difusa, es decir; sus orígenes, fundamentos, reglas, ventajas y desventajas. Asimismo se detalla el proceso para formular las funciones de pertenencia, como se evalúan dichas funciones, el resultado de los grados de pertenencia. Además se muestran los resultados al aplicar diferentes funciones de membresía al péndulo invertido.

El caso de estudio está basado en el péndulo invertido de la marca Quanser Consulting, mediante el cual con el presente trabajo de Tesis se sientan las bases para proyectos futuros basados en lógica difusa.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos generales	1
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología	2
1.5 Contenido de la Tesis	3

CAPÍTULO 2

LÓGICA DIFUSA Y EL PÉNDULO INVERTIDO

2.1 Introducción	5
2.2 Ejemplo de una función de pertenencia a un conjunto difuso	5
2.3 Método para diseño de un control difuso	8
2.4 Ventajas y desventajas de la lógica difusa	10
2.5 Motivos para utilizar técnicas difusas en el control de procesos	11
2.6 Péndulo invertido	12
2.6.1 Descripción del módulo del péndulo invertido	13
2.6.2 Descripción detallada de los componentes del péndulo invertido	14
2.7 Conclusiones	15

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

3.1 Introducción	17
3.1.1 Descripción del sistema completo	17
3.2 Módulo principal	19
3.3 Circuito de transmisión serie RS-232	19
3.4 Acopladores de señal	21
3.5 Fuentes de alimentación	24
3.6 Características eléctricas	25
3.7 Conclusiones	25

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Generalidades	27
4.2 Diseño de las funciones de membresía	27
4.3 Funciones de membresía y reglas	28
4.4 Desarrollo de las pruebas	33

4.4.1 Prueba de estado estable	34
4.4.2 Prueba de perturbaciones	35
4.4.3 Prueba de estabilización	35
4.5 Pruebas con otras funciones de membresía	36
4.6 Conclusiones	39
 CAPÍTULO 5	
CONCLUSIONES GENERALES	
Conclusiones del proyecto	40
 APÉNDICE	42
 BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Gráfica de comparación entre lógica clásica y lógica difusa	6
Figura 2.2	Respuestas capaces de un controlador lógico difuso (Fuzzy)	7
Figura 2.3	Ejemplo de una función de pertenencia	7
Figura 2.4	Representación gráfica del proceso de fuzzificación y defuzzificación	9
Figura 2.5	Dibujo esquemático del péndulo invertido	12
Figura 2.6	Módulo completo del péndulo invertido	14
Figura 2.7	Ubicación de los sensores del péndulo	15
Figura 3.1	Sistema completo funcionando en estado estable	18
Figura 3.2	Fotografía del controlador de lógica difusa	18
Figura 3.3	Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema	19
Figura 3.4	Diagrama de conexión del microcontrolador PIC 16F877	20
Figura 3.5	Circuito de transmisión serie	20

Figura 3.6	Acoplador de señal para la entrada de la varilla	21
Figura 3.7	Acoplador de señal para la entrada de la posición del carro	22
Figura 3.8	Acoplador de señal para la salida del microcontrolador	23
Figura 3.9	Filtro para cambiar una señal de PWM a analógica	24
Figura 3.10	Diagrama de las fuentes para los voltajes de referencia	25
Figura 4.1	Funciones de membresía en base a los ángulos de la varilla	28
Figura 4.2	Funciones de membresía en valores del microcontrolador	29
Figura 4.3	Funciones de membresía para la segunda entrada en centímetros	30
Figura 4.4	Funciones de membresía en valores del microcontrolador	30
Figura 4.5	Singletons de los voltajes de salida	31
Figura 4.6	Valores de salida variables de -10V a +10V	31
Figura 4.7	Interfaz del módulo de control con la PC	34
Figura 4.8	Gráfica de respuesta ante una perturbación del sistema	36

Figura 4.9	Gráfica de cuanto tiempo le toma al péndulo estabilizarse en su puesta a inicio	36
Figura 4.10	Funciones de membresía usadas para hacer las pruebas por segunda vez	37
Figura 4.11	Gráfica de puesta a inicio	38
Figura 4.12	Gráfica de estado estable	38
Figura 4.13	Gráfica de respuesta ante una perturbación	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Características eléctricas	25
Tabla 4.1	Relación entre los ángulos y los valores del microcontrolador	29
Tabla 4.2	Relación de valores reales en centímetros y valores del microcontrolador	30
Tabla 4.3	Relación del universo del microcontrolador con el universo real para la salida	32
Tabla 4.4	Tabla FAM	32
Tabla 4.5	Relación entre los ángulos y los valores reales del controlador	37

LISTA DE ABREVIATURAS

PWM	Modulación de ancho de pulso
LED	Diodo emisor de luz
PC	Computadora personal
RS-232	Protocolo de comunicación serie
DB9	Conector para computadora tipo D de 9 líneas
V	Volts
A	Amperes
Ω	Ohms
MHz	Mega Hertz
GND	Tierra del circuito eléctrico
NOx	Oxido Nitrógeno

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Una técnica de control que se está utilizando para actuar sobre plantas difíciles de controlar es el control por lógica difusa. El control en base a lógica difusa se trata de un control que se basa en la experiencia adquirida e intenta actuar como lo haría un operador humano, es decir, con reglas empíricas. Este tipo de control no lineal está dando muy buenos resultados en procesos no lineales para los cuales es difícil obtener su modelo.

Por otra parte, la industria actual necesita controlar los procesos en forma eficiente y que no dependan de operadores humanos expertos sino que las decisiones se tomen basándose en el comportamiento del sistema. Las redes neuronales y la lógica difusa solucionan esta dependencia porque a partir de los datos recogidos y las acciones que realiza el operador, el sistema es entrenado para que ejecute el control aprendiendo de cada acción hasta alcanzar el punto de mayor eficiencia [1].

La ventaja de la lógica difusa es que permite simular el comportamiento que tendría un operador humano sobre una máquina. Pero a diferencia de otros procesos que se automatizan mediante métodos matemáticos complejos, con el uso de la lógica difusa se puede hacer de una manera más sencilla, ya que no requiere complejas ecuaciones matemáticas para resolver los problemas.

1.2 Objetivos generales

Los objetivos principales de este trabajo son contribuir al diseño sistemático de controladores basados en modelos difusos y el de implementar un sistema computacional completo para la aplicación de dichos algoritmos de lógica difusa.

El objetivo principal del presente trabajo de Tesis es el de aplicar algoritmos de lógica difusa al sistema del péndulo invertido. El propósito es el de lograr que el péndulo invertido llegue al equilibrio; es decir que esté en un ángulo de 90° con respecto a la horizontal.

Otro de los propósitos es el de demostrar que para un proceso de automatización como éste no es necesario el uso de computadoras con gran capacidad de procesamiento, sino que se pueden aplicar algoritmos de control difuso usando microcontroladores de 8 bits y aún así obtener conclusiones de valor práctico sin la necesidad de tener mediciones precisas.

1.3 Justificación

Como se mencionó previamente el motivo de la investigación y desarrollo de este tema de Tesis es el de aplicar los conocimientos obtenidos acerca de microcontroladores y poder ver físicamente una aplicación práctica que los involucre.

Además, los sistemas que usan lógica difusa ya empiezan a verse en todas partes, en todo nuestro ambiente social, como por ejemplo en las lavadoras las cuales emplean sensores para la cantidad y calidad de agua que ocupa la ropa, siendo estas aparatos electrodomésticos, mientras que ámbito laboral pueden usarse en una forma muy variada en distintos dispositivos, como es el caso de la automatización de procesos, automatización de automóviles, y algunos otros aparatos muy usados como válvulas de presión o sensores para el calor de una caldera.

Este es un control muy usado ya que puede llegar a simular las acciones que un operador humano tomaría para solucionar un problema y además tiene la capacidad de aprender de acciones previamente tomadas. Este tipo de controlador puede modificarse de acuerdo a las necesidades del usuario sin gran complicación y aún así obtener la máxima eficiencia posible.

1.4 Metodología

Para poder realizar el control difuso de cualquier problema o sistema, no se ocupa saber mucho del sistema, esa es una de las ventajas de usar métodos de control como éste.

En el cual no se necesitan ecuaciones matemáticas que modelen el sistema ya que como es bien sabido en la práctica no siempre se llegan a esos valores ideales.

El proyecto está formado por dos módulos. Un módulo contiene sensores y una fuente que alimenta al péndulo. El segundo módulo es el de control difuso el cual sirve para controlar el péndulo y lograr que llegue al equilibrio

Las reglas de control difuso son las que rigen el comportamiento del sistema, éstas se pueden programar usando un lenguaje de alto nivel como C++. Sin embargo como ya se cuenta con una interfaz desarrollada previamente el LabWindows [8] no será necesaria dicha programación, simplemente se agregarán las funciones de membresía al microcontrolador y solo bastará conectar los dos módulos entre si para lograr el funcionamiento del sistema.

Debido a que los voltajes que usan los dos módulos no son iguales, se requiere de diseñar acopladores de señal usando amplificadores operacionales. El microcontrolador requiere de una fuente de alimentación de 0 – 5 Volts mientras que el péndulo una fuente de ± 12 Volts.

Una vez lograda la comunicación entre el microcontrolador y el módulo del péndulo se prosigue a realizar las pruebas para lograr que el péndulo se estabilice en el menor tiempo posible y se mantenga en un estado estable.

1.5 Contenido de la Tesis

En el Capítulo 1 se da una breve descripción de un problema que se resuelve con la lógica difusa. También se han planteado los objetivos generales de este trabajo.

En el Capítulo 2 se define el concepto de la lógica difusa, usos, ventajas y desventajas, y la forma en la que se interrelaciona con el control de sistemas, como es el ejemplo del péndulo invertido.

En el Capítulo 3 se detalla el software y hardware que componen el sistema de control con el cual se logra el objetivo de la Tesis que es el de asegurar que el péndulo invertido este en posición vertical.

En el Capítulo 4 se describen las pruebas realizadas explicando las funciones de membresía usadas, reglas, y la explicación de cómo funcionan y una descripción detallada de los resultados obtenidos.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones generales del proyecto de Tesis, mencionando los conocimientos adquiridos así como la aportación del presente trabajo.

CAPÍTULO 2

LÓGICA DIFUSA Y EL PÉNDULO INVERTIDO

2.1 Introducción

La lógica difusa es un tipo de lógica que reconoce más que simples valores verdaderos y falsos. Con la lógica difusa, las proposiciones pueden ser representadas con grados de veracidad o falsedad. Por ejemplo, el decir "hoy es un día soleado", puede ser 100% verdad si no hay nubes, 80% verdad si hay pocas nubes, 50% verdad si existen nubes y 0% si llueve todo el día.

La lógica difusa ha sido probada para ser particularmente útil en sistemas expertos y otras aplicaciones de inteligencia artificial. Es también utilizada en algunos correctores de voz que sugieren una lista de opciones para reemplazar una palabra erróneamente pronunciada. Al igual que en las industrias para monitoreo de algunos sistemas.

La lógica difusa, que hoy en día se encuentra en constante evolución, nació en los años 60 [9] como la lógica del razonamiento aproximado, y en ese sentido podía considerarse una extensión de la lógica multi-evaluada. La lógica difusa actualmente está relacionada y fundamentada en la teoría de los conjuntos difusos. De acuerdo con la teoría, el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto está determinado por una función de pertenencia, que puede tomar todos los valores reales comprendidos en el intervalo $[0,1]$.

2.2 Ejemplo de una función de pertenencia a un conjunto difuso.

La lógica difusa es básicamente una lógica con múltiples valores, que permite definir valores en las áreas que no se toman en cuenta con las evaluaciones convencionales de la lógica precisa: Si / No, Cierto / Falso, Blanco / Negro, etc. [9]. Se considera un súper conjunto de la lógica booleana. Con la lógica difusa, las proposiciones pueden ser representadas con grados de certeza o falsedad. La lógica tradicional de las computadoras

opera con ecuaciones muy precisas y dos respuestas: si o no, uno o cero. Actualmente, para aplicaciones de computadoras no bien definidas o sistemas vagos se emplea la lógica difusa. Un resumen en forma de bloque se muestra en la Figura 2.1:

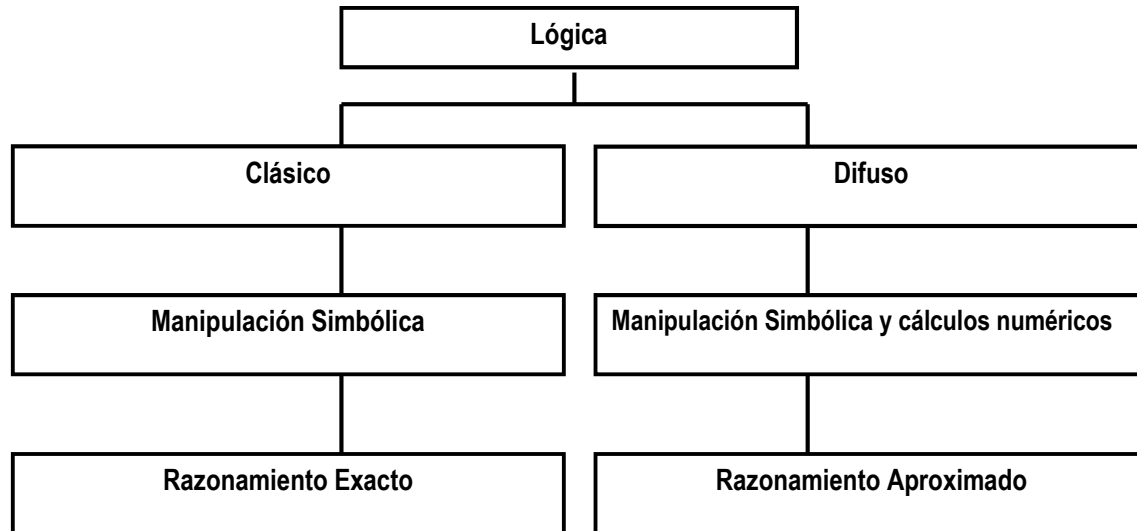


Figura 2.1 Gráfica de comparación entre lógica clásica y lógica difusa.

De la Figura 2.1, se observa que una posible desventaja del método difuso es que no brinda un valor exacto. Esto puede interpretarse como: si el proceso no presenta una falla real, sino aproximada, originaría un paro el cual causaría pérdidas económicas irreversibles. Por lo que sólo en algunos casos el uso de la lógica difusa es conveniente.

En la Figura 2.2 se muestra como la lógica difusa puede tomar gran cantidad de valores entre $[1, 0]$ ó entre Si/No. Esto nos da un grado de certeza para definir cosas que no son tan abstractas y que son definidas como Si o No. Como por ejemplo; se puede tomar que tan regularmente llueve durante un mes en una ciudad, o para decir si algo está tibio no podemos definirlo como caliente o como frío. Por medio de la lógica difusa pueden formularse matemáticamente nociones como un poco caliente o muy frío, para que sean procesadas por computadoras y cuantificar expresiones humanas vagas, tales como "muy grande" o "luz intensa". Esta forma, es un intento de aplicar la manera de pensar humana a la programación de las computadoras. Permite también cuantificar aquellas descripciones imprecisas que se usan en el lenguaje y las transiciones graduales en electrodomésticos

como ir de agua sucia a agua limpia en una lavadora, lo que permite ajustar los ciclos de lavado a través de sensores.

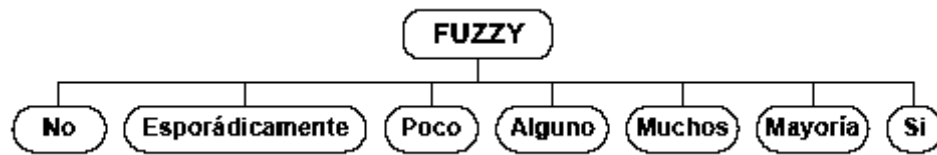


Figura 2.2 Respuestas capaces de un controlador lógico difuso (Fuzzy).

La habilidad de la lógica difusa para procesar valores parciales de verdad ha sido de gran ayuda para la ingeniería por su ayuda a tomar una decisión completa, en el diagnóstico y aislamiento de fallas en sistemas en tiempo real y analizar datos fuera de línea, en el control y modelado de sistemas tanto lineales como no lineales.

Un ejemplo de conjuntos difusos se puede observar en el universo de la edad de una persona. Por ejemplo tomando una persona x cuya edad sea de 20 años. Como se puede observar en la Figura 2.3, pertenece al conjunto difuso "Joven" y al conjunto difuso "Maduro". Se puede observar que posee un grado de pertenencia $\mu_A(x)$ de 0.6 para el conjunto difuso "Joven" y un grado de 0.4 para el conjunto difuso "Maduro"; también posee un grado de 0 para "Viejo". De este ejemplo se puede deducir que un elemento puede pertenecer a varios conjuntos difusos a la vez aunque con distinto grado. Así, nuestro individuo x tiene un grado de pertenencia mayor al conjunto "Joven" que al conjunto "Maduro" ($0.6 > 0.4$), pero no se puede decir, tratándose de conjuntos difusos, que x es joven o que x es maduro de manera rotunda.

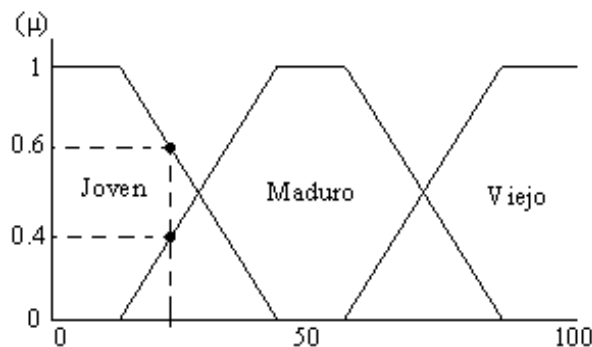


Fig. 2.3 Ejemplo de una función de pertenencia.

Como se ve la lógica difusa surge como un método económico para manejar sistemas complejos, además de que es una técnica eficiente en los casos donde no se conoce

totalmente la dinámica de los sistemas, es decir cuando no están matemáticamente definidos o se desconocen factores, también para casos en los que se necesite un reconocimiento de patrones ambiguos.

Los sistemas que apliquen lógica difusa, deben de poder responder rápidamente ante cualquier perturbación o ruido, y llevar la variable de salida a un valor ideal nuevamente. También deben de responder adecuadamente si se modifican los valores que se desean obtener por el usuario. Tomemos por ejemplo una planta termoeléctrica, en algunos países se les multa por altas emisiones de NO_x (Oxido Nítrico) en verano, mientras que en otra época del año pueden tener las emisiones que quieran, entonces las reglas de lógica difusa que rigen la turbina y la caldera se modifican para que regulen las emisiones de NO_x durante el verano, pero en cualquier otra estación del año se cambian para obtener la eficiencia máxima posible.

2.3 Método para diseño de un control difuso

Existen varios métodos para sintonizar o encontrar las funciones de membresía, y reglas de un control difuso, uno de los más comunes se basa en la determinación cualitativa de la gráfica que represente la respuesta del sistema, otro método sería usar algún software especializado como Xfuzzy 3.0 [10], uno más sería algoritmos genéticos, redes neuronales por mencionar algunos.

A lo largo de muchos años, el ámbito del control de procesos se ha mostrado como una de las áreas de mayor éxito en la aplicación de la lógica difusa, habiéndose desarrollado numerosas aplicaciones en ámbitos como el control industrial, guiando grúas y trenes, navegación de robots móviles autónomos, sistemas expertos en medicina, monitoreo de pacientes, junto a innumerables aplicaciones comerciales en los más variados aspectos de la vida diaria (cámaras fotográficas, aire acondicionado, electrodomésticos), que han contribuido a difundir con gran éxito la teoría difusa en general y la lógica difusa en particular.

Los pasos a seguir para construir un sistema de este tipo están bien definidos, existiendo incluso numerosas herramientas software de ayuda al diseño (por ejemplo, el entorno FuzzyTech [11]).

Es usual que el proceso de razonamiento sobre las variables se realice manejando valores difusos, tanto las acciones de control sobre el sistema como la entrada de valores de las variables de estado suelen ser valores nítidos. Por ello, es necesario que existan etapas de transformación entre el dominio difuso y el dominio numérico, que actúan a modo de interface entre el sistema bajo control y el propio controlador.

La interface de fuzzyficación realiza la transformación de los valores puntuales de entrada en conjuntos difusos, que sirven como entrada al conjunto de reglas encargado de realizar el proceso de razonamiento.

La base de conocimiento difuso sintetiza los conceptos que maneja mentalmente el controlador humano cuyo comportamiento experto deseamos modelar. Está compuesta de proposiciones difusas (variables y valores) que conforman reglas del tipo “SI *condición* ENTONCES *acción de control*”. El objetivo de la base de conocimiento difuso es obtener valores difusos para las variables de control, una vez realizado el razonamiento aplicando todas las reglas que sean relevantes para los valores actuales de las variables de estado.

Finalmente, el proceso de defuzzyficacion convierte los valores difusos inferidos para las variables de control en valores numéricos que constituyen la acción puntual final de control a realizar sobre el sistema.

Lo anterior se puede ver representado en la Figura 2.4; en la cual vemos la entrada pasando el proceso de fuzzificación, observando que reglas se pueden aplicar al motor de inferencia y aplicándole las mismas, después para el proceso de defuzzificación y se obtiene la salida deseada.

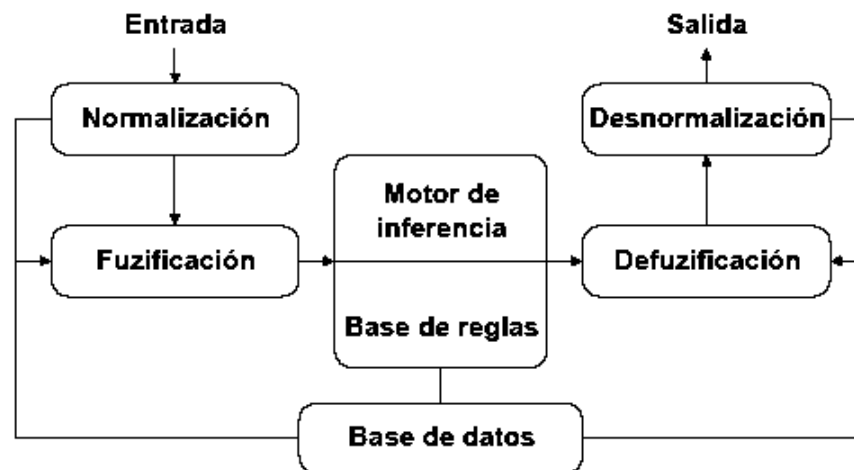


Figura 2.4 Representación grafica del proceso de fuzzificación y defuzzificación

La normalización en este proyecto es el proceso de cambiar los valores de los sensores tanto de la varilla y de la posición del carro a valores que se encuentren en el rango de los valores del microcontrolador. Luego se aplican las reglas dependiendo de cada entrada, las reglas están almacenadas en la base de reglas. Y la desnormalización sería el proceso de cambiar los valores de salida del microcontrolador para aplicarlos al módulo del péndulo. Se sigue este ciclo mientras el sistema está funcionando, ya que esto se tiene que hacer continuamente para asegurar que la posición de la varilla se mantenga en una vertical todo el tiempo. En el Capítulo 3 se proporciona una descripción detallada de cada uno de esos valores y el procedimiento de cálculo.

2.4 Ventajas y desventajas de la lógica difusa

La lógica difusa llega a tener grandes ventajas sobre otros métodos de control, a continuación se mencionan algunas, las cuales son:

Ventajas

- Son usadas variables lingüísticas y no numéricas haciéndolo similar al pensamiento humano.
- Relaciona entradas a salidas sin tener que entender todas las variables, permitiendo el diseño de un sistema más exacto y estable.
- Permite simplicidad en la solución de problemas.
- Es posible una rápida caracterización debido a que el diseñador del sistema no requiere ser experto en el uso del mismo.
- Por simplicidad de diseño resultan más económicos.
- Son más robustos en el sentido de que una vez que son puestos en funcionamiento los valores no se desajustarán.
- Simplifican la representación y la adquisición del conocimiento.
- Se puede representar un sistema muy complejo con pocas reglas.

Al parecer la lógica difusa lo puede llegar a tener todo, pero se ve limitada por una serie de restricciones.

Desventajas

- Aunque son fáciles de diseñar y se obtiene rápidamente un prototipo de lo que se podría obtener usando un sistema de control convencional, los sistemas difusos requieren mayor simulación y afinación después de que son puestos en operación.
- La tendencia cultural en favor de la precisión matemática
- Pérdida de inteligibilidad en la base de conocimiento, cuando se deja libre para que un módulo de aprendizaje la modifique, esto se puede llegar a dar al unir la lógica difusa con métodos de control como las redes neuronales en los cuales se le puede indicar al control que aprenda por sí mismo y que regule las salidas automáticamente.
- Poca flexibilidad en los programas de implantación de sistemas expertos, cuando se desea cambiar un valor particular en una regla.
- Pérdida de consistencia en la base de conocimiento cuando las reglas se modifican individualmente a la luz de una labor de aprendizaje.

2.5 Motivos para utilizar técnicas difusas en el control de procesos

Se llaman “sistemas clásicos” a aquellos sistemas de control que utilizan los algoritmos de control proporcional (P), proporcional integral (PI) y proporcional integral derivativo (PID). En los casos que aparecen comportamientos que no son lineales o variaciones en el entorno, los sistemas PID no son directamente aplicables y ha sido necesario crear otros nuevos capaces de realizar el control en estas situaciones; estos métodos reciben el nombre de adaptivos.

Los métodos adaptivos comparan la salida del proceso a controlar con otra ideal proporcionada por un modelo simulado, que se toma como referencia; el resultado de esta comparación se utiliza para ajustar los parámetros del controlador, utilizando algoritmos que describen el comportamiento del sistema mediante leyes de tipo físico o químico, según sea el proceso o utilizando métodos de estimación de parámetros. En ambos casos es indispensable obtener un modelo matemático del sistema y de una gran capacidad de cálculo.

Los sistemas de control difuso permiten describir un conjunto de reglas que utilizaría un ser humano para controlar el proceso, con toda la imprecisión que poseen los

lenguajes naturales y sólo a partir de esas reglas, generan las acciones de control. Por esta razón, también se les denomina controladores lingüísticos.

2.6 Péndulo invertido

Un péndulo invertido consiste en un vector el cual esta sujeto de su parte inferior, dando así la posibilidad de que su parte superior pueda oscilar en cualquier dirección. El objetivo de este proyecto es mantener en equilibrio una varilla metálica en posición vertical controlando el movimiento de un carro, sobre el cual tiene libertad de movimiento en un solo eje, Figura 2.5. Esto quiere decir que el carro solo puede desplazarse de izquierda a derecha y viceversa, haciendo estos movimientos se tratará de que la varilla se mantenga en posición vertical en equilibrio sin movimiento alguno.

Si el péndulo se encuentra en posición vertical, es decir, en la posición de equilibrio, cualquier perturbación hará que éste se caiga. Si en el momento que comienza a caer se le aplica una determinada fuerza al carro en el sentido en el que el péndulo cae, éste recuperará la condición inicial de equilibrio.

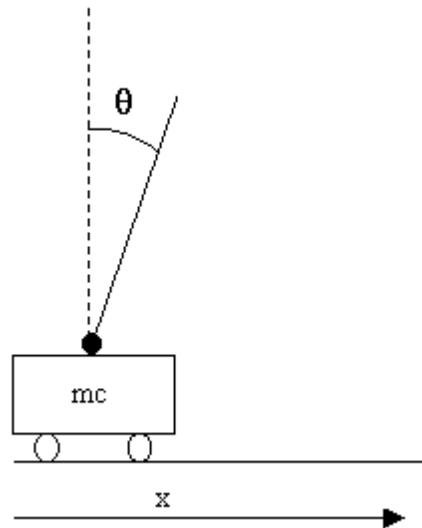


Fig. 2.5 Dibujo esquemático del péndulo invertido

El sistema de control deberá conocer la inclinación del péndulo para de esta manera ejercer la acción correctora mediante el movimiento del carro.

Por otro lado, es necesario mantener la posición de equilibrio con el carro en la posición central de su recorrido ya que de otra manera el mismo podría deslizarse hacia uno

de sus extremos y perder capacidad de movimiento para ejercer el control. También se debe mencionar que los sensores que se encuentran en los engranes del carro son hasta cierto punto delicados, si llega a atorar en los extremos del área de trabajo del carro que mueve la varilla metálica. Esto, ocasionaría que el motor se fuerce y puede llegar a dañarse y sería necesario reemplazarlo.

El sistema de control tendrá dos entradas: Inclinación del péndulo y posición del carro. Dichas entradas serán procesadas por el control difuso que dará como salidas la fuerza y el sentido de movimiento del carro.

Las aplicaciones que podemos encontrar para el péndulo invertido se basan en la importancia del balance activo, como es el caso de los robots de piernas o extremidades donde lo mas importante ha sido el balanceo de estos, ya que la parte esencial para que no caiga el cuerpo del robot, otra aplicación sería el posicionamiento de un satélite con respecto a la tierra, en este caso el satélite esta en movimiento y las antenas que se encuentran en la tierra no pueden dejar que se mueva demasiado, ya que sino se saldría del rango de comunicación entre ellos. Es así como podríamos decir que están sujetos estos dos cuerpos (satélite y antena) por un vector virtual el cuál en la parte de la tierra se encuentra fijo y la parte en movimiento en el espacio, haciendo así la función del péndulo invertido. Existen más aplicaciones para el péndulo invertido como lo es la estabilidad en grúas, edificios, aplicaciones didácticas, y muchos más [2].

2.6.1 Descripción del módulo del péndulo invertido

El módulo del péndulo invertido es de la marca Quanser Consulting [3]. El cual cuenta con una fuente de voltaje de -12 Volts (-Vs) y +12 Volts (+Vs). También tiene bornes los cuales son para obtener la salida de los sensores de posición del carro y de la varilla (S1 y S2 respectivamente). Cuenta con una etapa de potencia la cual es la encargada de mover el carro hacia el lado que se desee mover. También con una barra sobre la cual se desliza el carro, y la varilla, siendo esta última el objeto a controlar. Todo esto se observa en la Figura 2.6. A continuación se describe brevemente cada uno de los componentes.

*1.- Módulo del péndulo invertido

*2.- Zoom de los bornes del módulo del péndulo invertido

2.1 Bornes de -12V, GND y +12V

2.2 Bornes donde se encuentran los sensores S1 y S2

2.3 Etapa de potencia

*3.- Barra sobre la cual se desplaza el carro que sostiene la varilla

*4.- Carro, varilla y sensores. El carro está compuesto por un motor de CD el cual se desplaza de izquierda a derecha usando voltajes variables de +12V hasta -12V.

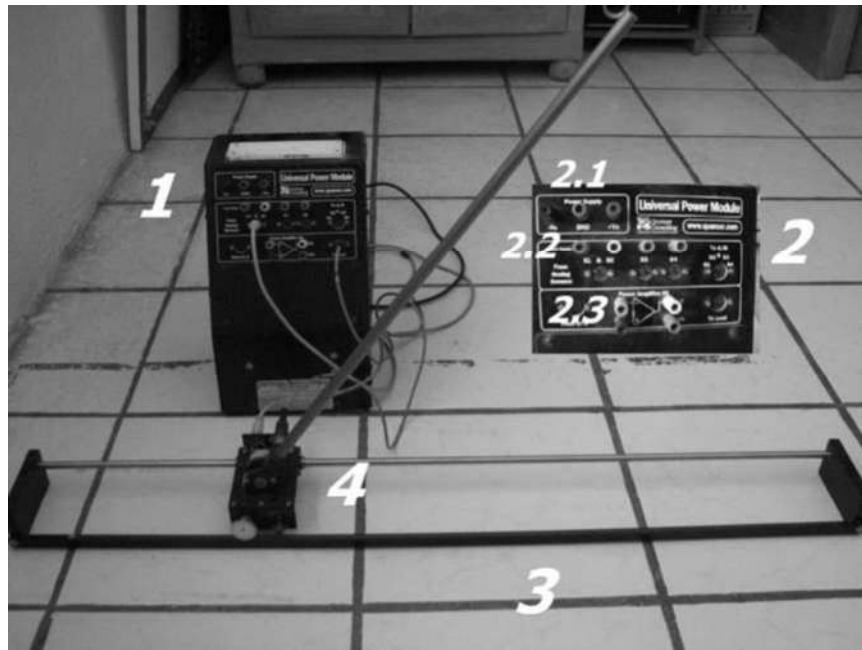


Figura 2.6 Módulo completo del péndulo invertido.

2.6.2 Descripción detallada de los componentes del péndulo invertido

El péndulo invertido cuenta con dos sensores de movimiento, el primero mide la posición del carro, mientras que el segundo proporciona la inclinación del péndulo tal y como se observa en la Figura 2.7.

El primer sensor indica en que posición de la barra se encuentra el carro, si el carro se encuentra en el extremo izquierdo, el voltaje que mediremos será de -12V, mientras que si se encuentra en el extremo derecho, el voltaje que se medirá será de 12V. Se debe de tener cuidado que al empezar a realizar las pruebas el sensor marque cero o sea a la mitad de la barra, ya que si no verificamos esto, podemos causar daños al sistema ya que los valores que se midan serán erróneos.

El segundo sensor indica la inclinación de la varilla, la inclinación máxima es de 45° hacia cualquier lado, este sensor proporciona un voltaje de $-2.5V$ estando en su posición de máximo valor a la izquierda, hasta, $2.5V$ estando en su posición de máximo valor a la derecha.

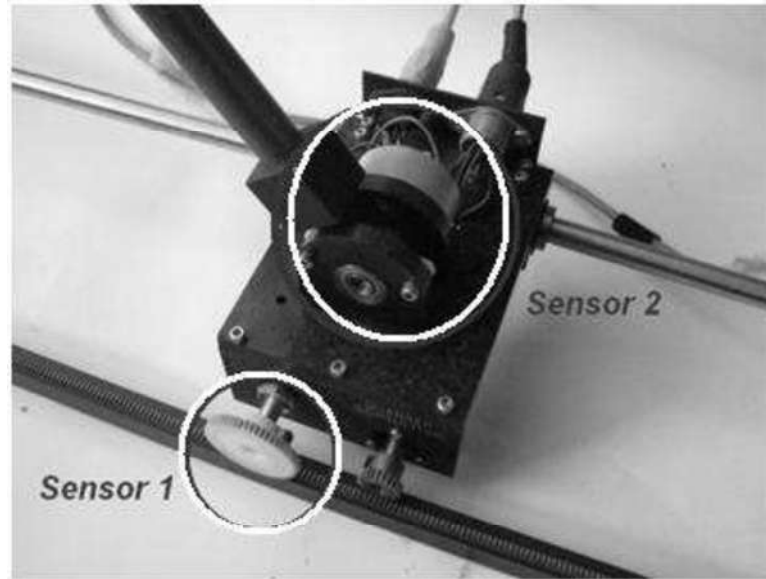


Figura 2.7 Ubicación de los sensores del péndulo.

Como se ve con los dos sensores antes mencionados y las reglas de control difuso se podrá controlar el movimiento del péndulo. Para poder controlar el sistema es necesario toda una Tabla de reglas que interrelacionen las dos entradas y dependiendo de la combinación de las mismas se ordene así una salida que sea la ideal para el control del sistema.

2.7 Conclusiones

En esencia un controlador lógico difuso, contiene un algoritmo que es capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una estrategia de control automático. Con la lógica difusa se pueden diseñar aplicaciones para que las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior, con lo que se busca imitar el comportamiento humano.

Además, gran parte de los procesos ya sean industriales o de máquinas de uso común empiezan a tener esta estrategia de control, por lo cual es recomendable que empecemos a conocer más de este tipo de control.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DEL

CONTROLADOR

3.1 Introducción

En este Capítulo se describe la metodología para el diseño y la construcción del controlador de lógica difusa.

3.1.1 Descripción del sistema completo

El sistema completo es conformado por el módulo del péndulo invertido y por el controlador de lógica difusa. Este último es el encargado de proporcionar el control en base de lógica difusa para mantener el sistema estable.

La Figura 3.1 muestra una fotografía del sistema completo. El controlador de lógica difusa se encuentra a un lado del módulo del péndulo invertido. Cada uno de los bornes del controlador, está conectado a su borne correspondiente del módulo del péndulo invertido. En las siguientes secciones se describe más a detalle este sistema

En la Figura 3.2 se muestra la fotografía del controlador diseñado. El diseño es desmontable con el objetivo de facilitar el mantenimiento del mismo, así como para revisión de sus componentes o la manipulación de los circuitos. También el objetivo es el de hacer un sistema mínimo para el control de péndulo invertido.

En la parte frontal del controlador se encuentran 6 bornes. Cada uno con calcomanías para identificarlos fácilmente y poderlos conectar con su borne similar del módulo del péndulo invertido. También se encuentra un botón de *reset* en la parte superior derecha del mismo panel frontal. Y en la parte lateral se tiene un conector hembra del tipo serie DB9 para la conexión entre el controlador y la PC.

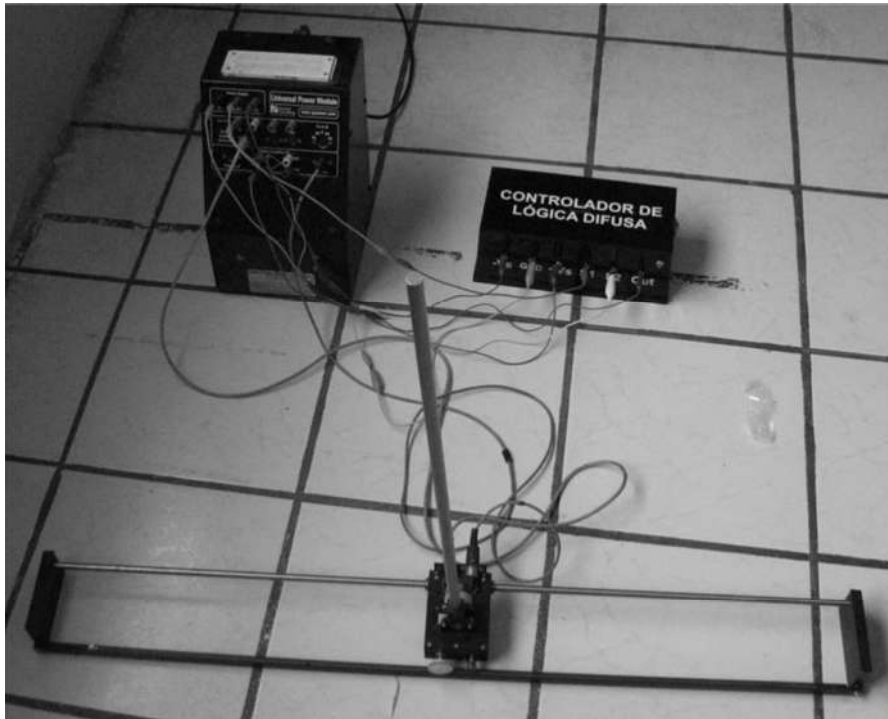


Figura 3.1 Sistema completo funcionando en estado estable



Figura 3.2 Fotografía del controlador de lógica difusa

En la Figura 3.3, se muestra un diagrama de bloques del diseño o prototipo. Donde el funcionamiento básicamente es el siguiente: del módulo del péndulo invertido obtenemos dos señales una para la posición de la varilla y otra para la posición del carro, estos valores

se transforman mediante los acopladores de señal a valores de voltaje que sean compatibles con el módulo de control. De este último obtenemos un valor de salida el cuál está en forma de señal PWM y se cambia a una señal analógica, luego se usa un acoplador de señal para mandarlo de nuevo al módulo del péndulo con los valores de voltaje correctos para su funcionamiento. La descripción de cada uno de los componentes se describe en el desarrollo de este Capítulo.

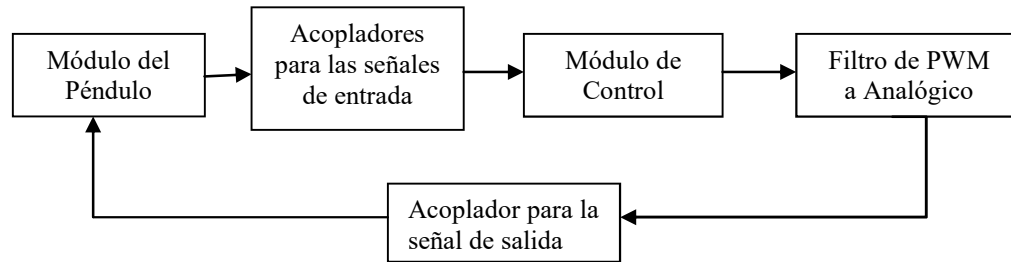


Fig. 3.3 Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.

3.2 Módulo principal

La parte central del controlador está conformada básicamente por el PIC16F877 [4], en el cual se encuentra la implementación del algoritmo de lógica difusa, entre sus características principales están un bus de 8 bits, memoria de programa flash de 8K, puede trabajar hasta un reloj de 20Mhz, 5 puertos de E/S, convertidor de A/D de 8 canales, 3 temporizadores, interface serie RS232, un par de módulos PWM y cada instrucción se ejecuta en cuatro ciclos de reloj conectado al microcontrolador (200 ns por instrucción) [5]. El diagrama de conexión del microcontrolador implementado en esta Tesis se muestra en la Figura 3.4.

3.3 Circuito de transmisión serie RS-232

Para la tarea de comunicación entre el módulo de control y la PC, se usó el módulo interno de comunicación serie proporcionado por el microcontrolador. Las líneas del microcontrolador que se usan para la transmisión serie son: Tx y Rx (que son las pines 25 y 26 del microcontrolador 16F877 respectivamente). Estas salidas de transmisión y recepción

La salida del circuito integrado se conecta a un puerto serie tipo hembra del tipo DB9 hembra, el cual se encuentra a un costado del módulo de control para de esa forma facilitar su conexión a la PC.

3.4 Acopladores de señal

Para lograr la comunicación exitosa entre el módulo del péndulo invertido con el módulo del controlador, se diseñaron unos acopladores de señal. Debido a que el módulo del péndulo maneja voltajes variables para cada uno de sus 2 sensores, para la posición de la varilla son de $-2V$ a $+2V$, y para la posición del carro es de $-5V$ a $+5V$ y como las entradas que el microcontrolador maneja son en voltajes TTL (0 a 5 volts), es necesario un ajuste para un control adecuado.

Los acopladores de señal se hicieron con el uso de circuitos integrados del tipo LM324 [6]. La Figura 3.6 muestra cómo está compuesto el acoplador de señal para la entrada de la posición de la varilla. El voltaje de referencia es de -2 volts y los voltajes variables serán de $-2V$ a $+2V$. Todas las resistencias son de $1\text{ K}\Omega$.

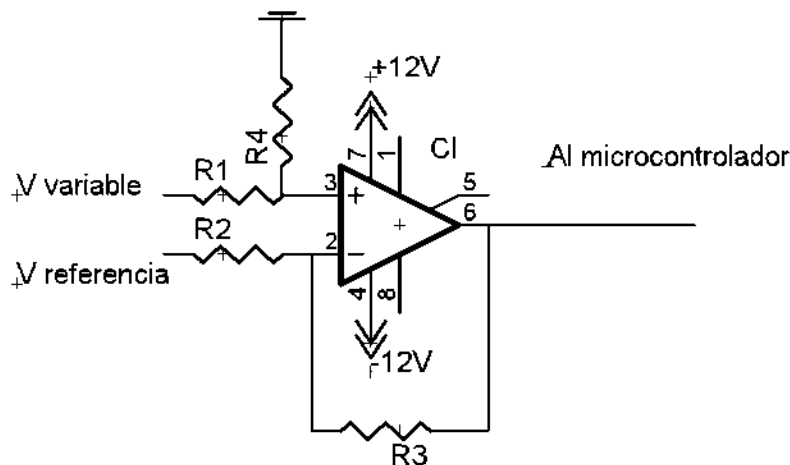


Fig. 3.6 Acoplador de señal para la entrada de la varilla.

Como se mencionó previamente todas las resistencias son iguales con lo cual se tiene una ganancia unitaria a la salida del circuito. La expresión correspondiente al voltaje de salida (V_o) está dada por la Ecuación 3.1:

$$V_o = -\left(\frac{R_3}{R_2}\right) * V_{referencia} + \left(\frac{R_3+R_2}{R_2}\right) * \left(\frac{R_4}{R_4+R_1}\right) * V_{variable} \quad (3.1)$$

La Ecuación 3.1, corresponde a todos los acopladores de señal que componen el módulo de control ya que al ajustar los valores de los voltajes de referencia es la forma más fácil de llegar a las salidas deseadas.

En la Figura 3.7, se muestra el acoplador para la señal de la posición de carro, este acoplador está formado por un divisor de voltaje a la salida para lograr conseguir los valores deseados para la entrada. A diferencia del acoplador anterior, a este se le agregó un divisor de voltaje a la salida para que los valores obtenidos no excedieran los admitidos por el microcontrolador. La Ecuación de este acoplador es la 3.2.

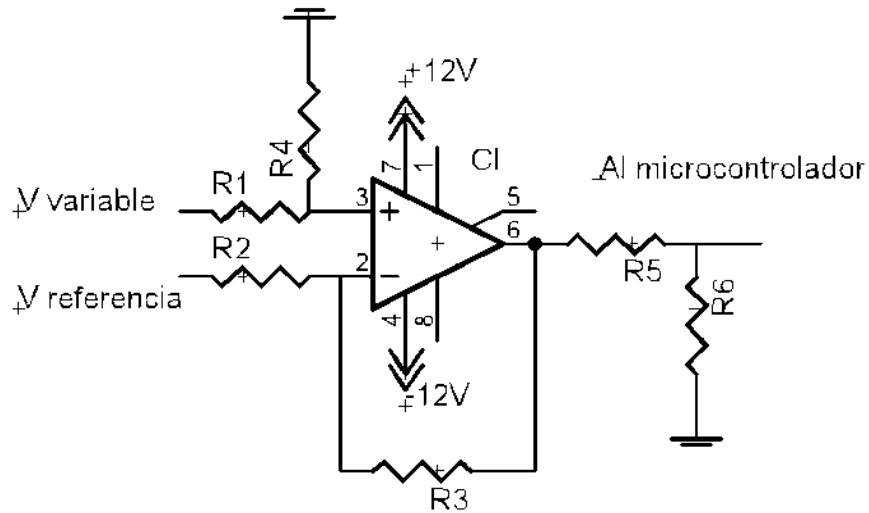


Fig. 3.7 Acoplador de señal para entrada de posición del carro

$$V_o = -\left(\frac{R_3}{R_2}\right) * V_{referencia} + \left(\frac{R_3+R_2}{R_2}\right) * \left(\frac{R_4}{R_4+R_1}\right) * V_{variable}$$

$$V_o' = \left(\frac{R_6}{R_6+R_5}\right) * V_o \quad (3.2)$$

La salida viene a jugar un papel también importante y al igual que las entradas se diseñó un acoplador de señal, mostrado en la Figura 3.8, para poder obtener los valores deseados. Primero, como el microcontrolador proporciona una salida PWM, ésta se tiene que transformar a una señal analógica y esto se logra con un filtro pasa bajas que se describe a continuación, y después de eso se diseñó el acoplador de señal para cambiar de

un voltaje variable de 0 a 5 Volts (Valores de voltaje entregados por el microcontrolador) a un valor de -10 V a +10 Volts para controlar el movimiento del sistema.

La única función del filtro (Figura 3.9) [7], fue la de cambiar el voltaje proveniente del microcontrolador en PWM a una señal analógica. Se utilizó un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte de 160 KHz dado por la Ecuación 3.3. Para el filtro se uso una resistencia de 1K Ω y un capacitor de 100nF.

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * 1K\Omega * 1nF} = 160 KHz \quad (3.3)$$

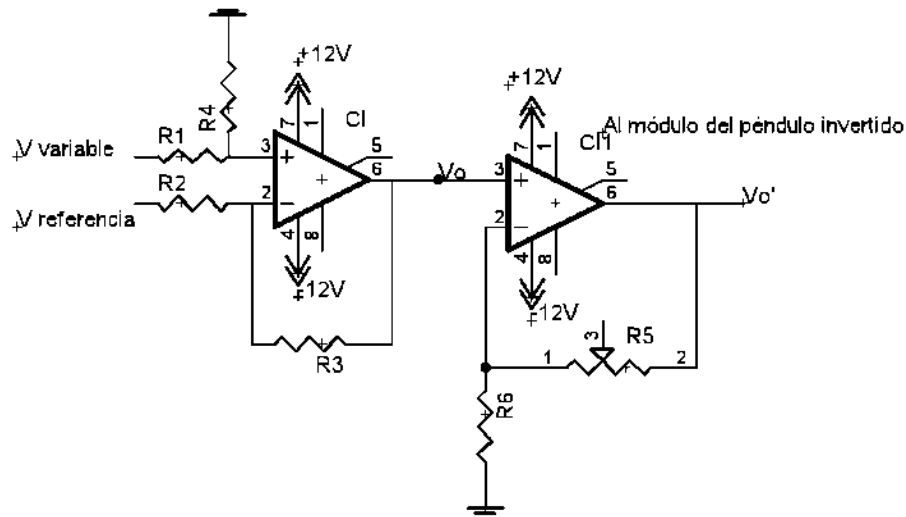


Fig. 3.8 Acoplador de señal para la salida del microcontrolador

De nueva cuenta para este acoplador se usaron todas las resistencias de un valor igual a 1 K Ω , pero para poder obtener la ganancia exacta se uso un preset representado aquí por la resistencia 5 (R5), la cual está ajustada a un valor de 2.915 K Ω . Obteniendo una ganancia de 3.915 dada por la Ecuación 3.4. El voltaje en la entrada de referencia se usó de 2.5 V el cual al multiplicarlo por la ganancia da aproximadamente 10V mientras que la entrada variable es otorgada por la salida del filtro pasa bajas descrito previamente.

$$V_o = -\left(\frac{R_3}{R_2}\right) * V_{referencia} + \left(\frac{R_3+R_2}{R_2}\right) * \left(\frac{R_4}{R_4+R_1}\right) * V_{variable}$$

$$V_o' = \left(\frac{R_6}{R_5+R_6}\right) * V_o \quad (3.4)$$

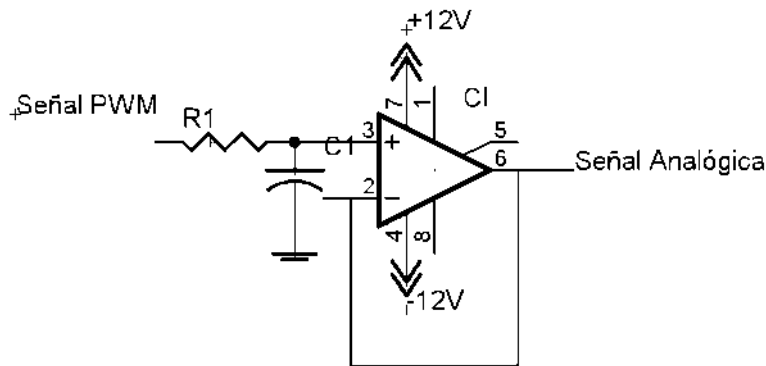


Fig. 3.9 Filtro para cambiar una señal de PWM a analógica

3.5 Fuentes de alimentación

Para que el módulo de control funcione se necesitan los voltajes de alimentación para el microcontrolador, al igual que los voltajes de referencia para cada acoplador de señal, además de los voltajes de alimentación para los circuitos integrados y todos los componentes que lo integran.

Este objetivo se logró tomando de la fuente de alimentación del módulo del péndulo el cual entrega valores de +12V y -12V, y así se obtuvo un funcionamiento adecuado. Los voltajes de referencia para cada uno de los acopladores de señal, se obtienen usando amplificadores operacionales y presets para ajustar los valores de ganancia de una manera precisa. Además que con el uso de los presets obtener los valores es más sencillo.

Para las fuentes de los tres acopladores de señal se usó un modelo igual al mostrado en la Figura 3.10. Hay dos diferencias en el diseño de los voltajes de referencia que se usaron para los acopladores; una los valores a los que se ajustaron los presets (R1) de cada uno, y la otra es que para el voltaje de referencia del acoplador de salida (2.5 Volts) a la entrada del circuito se puso el voltaje de -12 Volts, mientras que para los voltajes de los acopladores de entrada (-5 Volts y -2 Volts) la entrada que se usó fue la de +12 Volts.

La resistencia R2 se tomó de un valor de 1 K Ω y los presets todos se usaron de 5 K Ω . Cada preset se calibró usando un osciloscopio y esto garantizó un mejor funcionamiento y que las señales concordaran y por lo cual se consiguió una mejor eficiencia en el diseño. La Ecuación del amplificador es la 3.5.

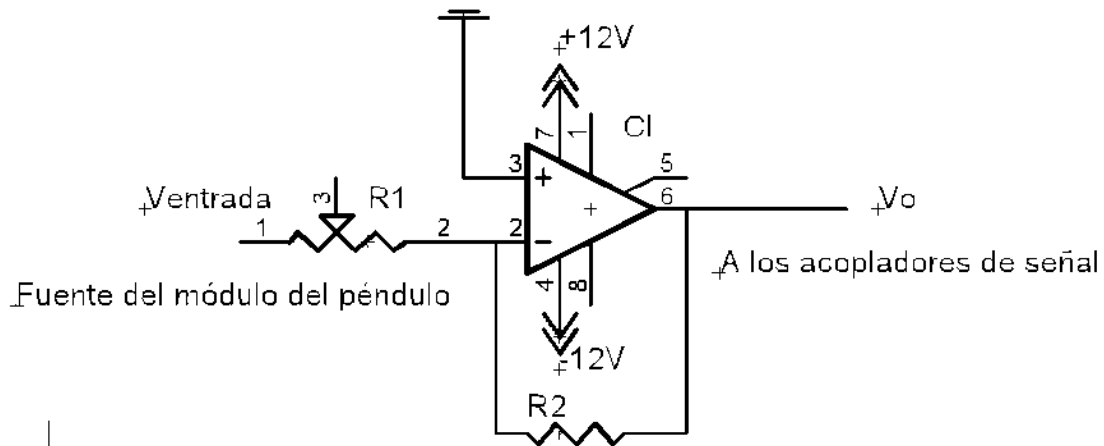


Fig. 3.10 Diagrama de las fuentes para los voltajes de referencia.

$$V_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) * V_{entrada} \quad (3.5)$$

3.6 Características eléctricas

A continuación se muestra la Tabla con las características eléctricas del controlador.

Tabla 3.1 Características eléctricas del controlador de lógica difusa.

Rango de la señal de entrada	±12 Volts
Salida Analógica	0 a 5 Volts analógica
Comunicación con la PC	RS-232
Fuente de alimentación	± 12 Volts

3.7 Conclusiones

En este Capítulo se explicó a detalle, el diseño y la construcción del prototipo del controlador de lógica difusa. Es importante destacar que para lograr el procesamiento adecuado de las señales de entrada, estas deben de cumplir con los requisitos tales como el rango permisible del convertidor (0 a 5 Volts) y en el caso de la salida también hay que

convertir la señal de PWM de 0 a 5 volts, a los niveles de voltaje requeridos por el módulo del péndulo; es decir, ± 10 volts

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Generalidades

Para lograr el control del péndulo invertido usando el algoritmo de lógica difusa se procedió a la creación de las funciones de membresía y sus reglas correspondientes. Se diseñaron varias funciones de membresía hasta que finalmente se logró llegar a las funciones finales que son las que se quedaron grabadas en el microcontrolador y con las cuales se cumple el objetivo de esta Tesis. Es decir que durante las pruebas se estuvieron modificando las funciones de membresía, para dar un ajuste cada vez más preciso para un mejor funcionamiento del controlador.

Se probó también el tiempo de respuesta ante alguna perturbación y se obtuvo un resultado satisfactorio ya que después de que se provoco la perturbación, el péndulo logró llegar a un estado estable y en poco tiempo.

En este Capítulo también se muestra el resultado obtenido con otras funciones de membresía con el objetivo de mostrar que no son únicas las funciones de membresía aquí desarrolladas, obteniéndose un buen desarrollo en ambos casos

4-2 Diseño de las funciones de membresía

Para el diseño de las funciones de membresía se imitó al péndulo invertido con una raqueta y el carro con una mano. Notando así la relación estrecha que se guardaba entre entrada y salida. Se llegó a la conclusión de que si la raqueta caía de una manera suave hacia cualquier lado, el movimiento de la mano tendría que ser suave, pero si caía de una forma rápida y vertiginosa el movimiento de la mano tendría que ser rápido y además fuerte para compensar la caída. Una vez que se comprobó esto, se procedió al diseño de las funciones de membresía tanto para entrada como para salida.

De esta forma se demuestra que los controladores lógicos difusos dependen mucho del conocimiento y planteamiento del operador para tratar de imitar el pensamiento humano al igual que su forma de reacción

4.3 Funciones de membresía y reglas

Para lograr el control del péndulo invertido, se deben de considerar los valores que son entregados por los sensores, pero también es necesario recordar que se tienen que acoplar para que puedan ser entendidos por el microcontrolador el cual sólo ve valores de voltaje como se muestra en el Capítulo 3.

Para el primer sensor, el cual indica la posición del péndulo. El universo de discusión está definido por los extremos a los cuales llega la varilla, para este caso se tomaron todos los valores comprendidos entre un extremo al otro, por lo tanto tenemos un universo de discusión de (Figura 4.1):

$$U = [-45^\circ, +45^\circ]$$

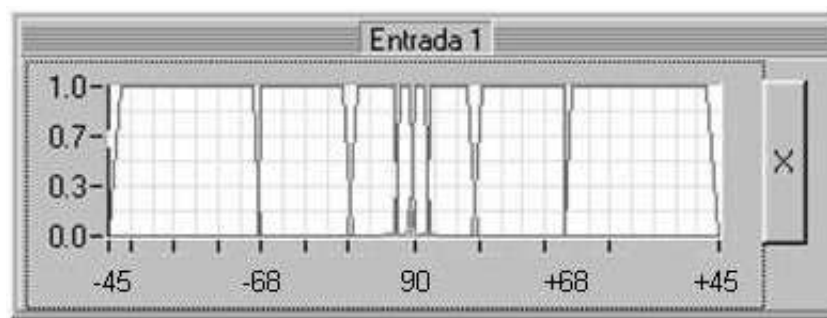


Figura 4.1 Funciones de membresía en base a los ángulos de la varilla.

Y dado que el microcontrolador sólo observa valores de voltaje y no ángulos entonces se tuvieron que adaptar las señales para que fueran “entendidas” por el microcontrolador. Esto se logró con el uso de los acopladores de señal (Descritos previamente en el Capítulo 3 de esta Tesis) y entonces los valores que el microcontrolador observa son los mostrados en la Figura 4.2

Como se muestra en la Figura 4.2, ahora los valores han sido codificados de 0 a 255, donde el ángulo de -45° corresponde al valor numérico de 0 del microcontrolador, el

ángulo de 0° corresponde a la mitad del universo del microcontrolador el cual es 127 y por último el ángulo de $+45^\circ$ es equivalente al número 255

Ahora nuestro universo quedaría compuesto de la siguiente forma:

$$U = [0, 255]$$

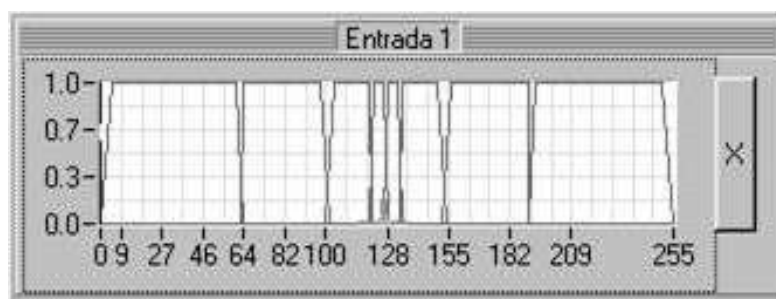


Figura 4.2 Funciones de membresía en valores del microcontrolador.

En la Tabla 4.1 se muestra una correlación entre los valores reales y los valores del microcontrolador para cada función de membresía. Iniciando a contar desde el extremo izquierdo hacia el extremo derecho.

Tabla 4.1 Relación entre los ángulos y los valores del microcontrolador.

Funciones de Membresía	Valor real del ángulo	Valor en el Microcontrolador
1	-45 a -66	0 a 64
2	-67 a -78	63 a 100
3	-79 a -84	98 a 120
4	-85 a 90	119 a 128
5	90 a 85	128 a 137
6	84 a 79	135 a 155
7	78 a 67	153 a 190
8	66 a 45	189 a 255

Las 8 funciones del primer sensor (El de la posición de la varilla) se dividen en 2 grupos, cada grupo está conformado por 4 funciones de membresía. El primer grupo controla los valores para cuando la varilla se encuentra cargada hacia el lado izquierdo, y el segundo grupo se encarga de los valores para el lado derecho.

Para el segundo sensor que proporciona la posición del carro se hace algo parecido que con el primer sensor. La función del sensor es la de limitar la posición del carro, ya que por si algún motivo llega a estar en alguno de los extremos se pierde el contacto con el riel y fallaría el control o en un caso más grave podría forzarse el motor y ocasionando daños al mismo y sería necesario reemplazarlo.

Con este sensor el universo de discusión en centímetros quedaría conformado por el universo de discusión mostrado en la Figura 4.3, cuyos valores son:

$$U = [-43, +43 \text{ centímetros}]$$

La misma gráfica vista en valores del microcontrolador se observa en la Figura 4.4, también se muestra la Tabla 4.2 que relaciona los valores en centímetros y valores del microcontrolador. Tabla 4.2:

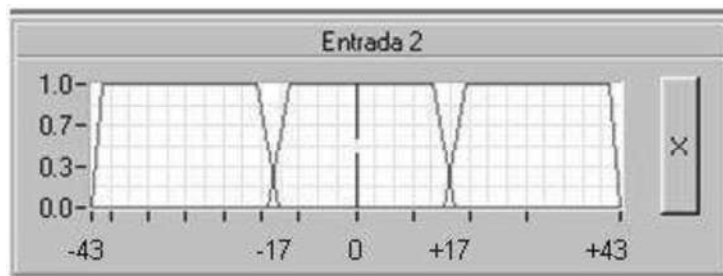


Figura 4.3 Funciones de membresía para la segunda entrada en centímetros.

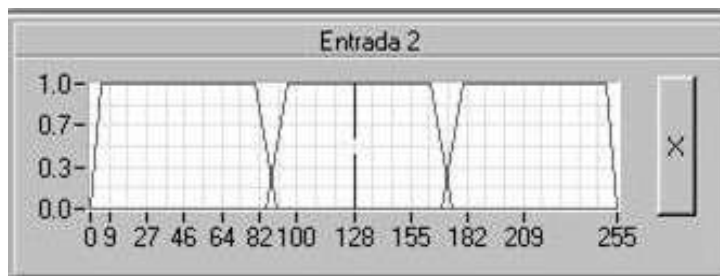


Figura 4.4 Funciones de membresía en valores del microcontrolador.

Tabla 4.2 Relación de valores reales en centímetros y valores del microcontrolador.

Funciones de Membresía	Valor real en centímetros	Valor en el Microcontrolador
1	-43 a -12	0 a 87
2	-12 a 12	85 a 178
3	12 a 43	175 a 255

Ahora que ya se diseñaron las funciones de membresía para los dos sensores, se prosigue a crear las funciones de salida correspondientes. Las variables tanto de entrada como de salida están muy relacionadas ya que para cada combinación de los valores de entrada existirá uno de salida, es decir si el péndulo cae un poco entonces el carro se moverá poco y si cae mucho entonces el carro se moverá más fuerte.

La variable de salida es la acción de control que se le entregará al carro para determinar que tan fuerte tendrá que ser el movimiento de este para lograr levantar o mantener en equilibrio al péndulo, el rango de la señal PWM es de 0 a 5 volts. De forma que podemos decir que la variable de acción de control tiene un universo $U = [0, 5]$ y sus particiones en términos de voltaje digitales se muestran en la Figura 4.5. Los mismos valores vistos en valores de voltaje reales se ven en la Figura 4.6

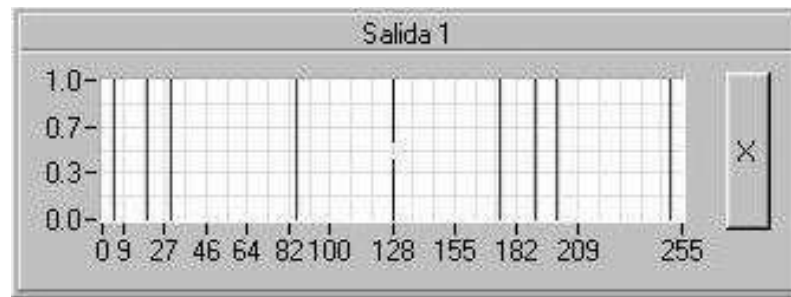


Figura 4.5 Singletones de los voltajes de salida.

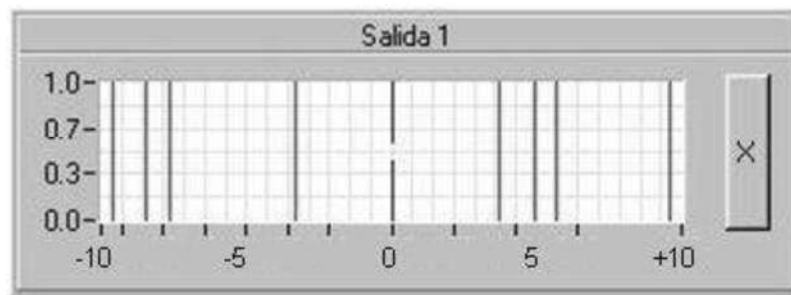


Figura 4.6 Valores de salida variables de -10V a +10V.

Debido a que el péndulo maneja voltajes reales de -10 a +10 volts, se tuvieron que ajustar los valores del universo proporcionado por el microcontrolador $U = [0, 5]$, y por lo tanto el universo real es $U = [-10, 10 \text{ volts}]$. Así la relación del universo del microcontrolador con el universo real esta dado en la Tabla 4.3

Tabla 4.3 Relación del universo del microcontrolador con el universo real para la salida

Funciones de Membresía	Valores de voltaje reales	Valores de voltaje del microcontrolador
1	-9.5	.5
2	-7.5	1
3	-6.5	1.5
4	-3	2
5	3	3
6	5	3.7
7	6	4
8	9.3	4.6

Partiendo de estas propiedades se diseña la relación entre las variables, donde la manera de relacionarlas es por medio de las reglas de inferencia que actuarán en el controlador. Las funciones de membresía que se aplican son 8 para el primer sensor y 3 para el segundo, y al conjuntarlas se obtienen 24 reglas las cuales dictaminan las respuestas ante cada evento que se suscite. Esto se muestra en la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Tabla FAM

	XN	NG	NM	NP	PP	PM	PG	XP
IZQ	PP	PP	PP	PP	Zo	Zo	Zo	Zo
CEN	XN	NG	NM	NP	PP	PM	PG	XP
DER	Zo	Zo	Zo	Zo	NP	NP	NP	NP

La Tabla 4.4 llamada en el ambiente de control como “Tabla FAM (Funciones de Membresía Aplicadas, por sus siglas en inglés)” nos brinda la relación de las dos variables de entrada como son la posición del carro y de la varilla. En las columnas se encuentran los valores que puede tomar el sensor de la varilla que son descompuestos en 8 los cuales son:

XN: Extremo Negativo

NG: Negativo Grande

NM: Negativo Medio

NP: Negativo Pequeño

PP: Positivo Pequeño

PM: Positivo Medio

PG: Positivo Grande

XP: Extremo Positivo

Por otra parte los componentes de las filas representan los valores que entrega el sensor colocado en el carro. Los cuales son:

IZQ: Cargado a la izquierda

CEN: Centro (Lugar de funcionamiento deseado)

DER: Cargado a la derecha.

Las reglas dictaminan que cuando el carro se encuentre cargado hacía cualquiera de los dos extremos ya sea derecho o izquierdo y sin importar la posición de la varilla, el carro deberá de desplazarse en sentido opuesto para así evitar que se force el motor, o que simplemente ya no se tenga control sobre el péndulo.

4.4 Desarrollo de las pruebas

Después de programar con los valores antes mencionados al microcontrolador, se conecta a la PC para así observar la respuesta ante los diferentes eventos. Los eventos en los cuales se probó el funcionamiento de las funciones y de las reglas fueron tres los cuales son: puesta a inicio del sistema, el sistema en estado estable y respuesta del sistema ante alguna perturbación.

Esto consistió en ver si el péndulo llegaba a un estado estable, después observar la respuesta ante alguna perturbación externa y la última prueba consiste en ver cuanto tiempo le toma al péndulo estabilizarse. Para las dos últimas pruebas se registraron los tiempos de retardo del péndulo para la estabilidad.

4.4.1 Prueba de estado estable

Esta prueba consiste en ver que el péndulo llega al equilibrio también llamado su estado estable. Para ver la respuesta del péndulo en forma gráfica, se tomó una impresión de la pantalla de la interfaz en LabWindows [8] la cual nos permite ver la manera en las cuales responde el control. Para las variaciones del valor de el ángulo, se puede observar que las variaciones no pasan de cierto punto en el eje de las Y, sólo varía de 98 a 155 en valores del microcontrolador, esto mismo visto en valores reales son voltajes de -3V a +3V. Lo cual nos indica que solo se están aplicando pequeños voltajes hacia la izquierda y derecha para controlar el péndulo en una posición correcta y deseada por nosotros.

Para dar una mejor descripción de lo que se esta mencionando, se agrego la impresión de pantalla, Figura 4.7, de la interfaz.

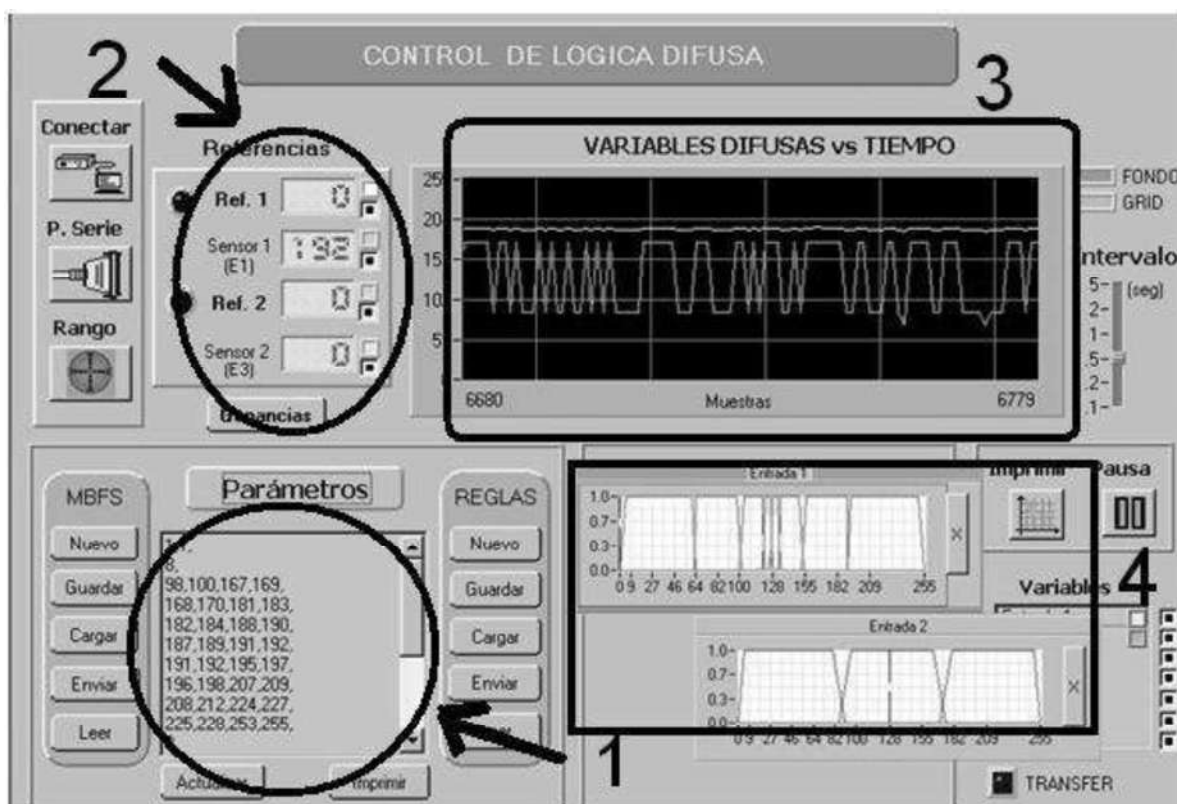


Figura 4.7 Interfaz del módulo de control con la PC

Como se puede observar, la interfaz básicamente esta compuesta por 4 partes señaladas en la imagen. Y a continuación se dará la descripción breve de cada una, para que en casos futuros sólo mostrar la gráfica marcada con el número 3.

1. Espacio donde se introducen los parámetros de las funciones de membresía y de las reglas, además cuando el microcontrolador se encuentra funcionando ahí se muestran los valores con los cuales esta funcionando.
2. Se observa los valores que están siendo entregados por los sensores y que se muestran en la gráfica
3. Está gráfica de variables difusas vs el tiempo vemos dos líneas, la línea superior es el valor de entrada uno, la cual representa las variaciones del ángulo en los que se encuentra la varilla. Las líneas oscilantes son los valores de salida que se le aplican al carro que la sostiene. Los valores que oscilan en la parte de abajo solo lo hacen en cierto rango, y los valores de voltaje reales aplicados para esos rangos son de [-3 Volts a +3 Volts]
4. En esta parte se muestran las funciones de membresía para las dos entradas esto solo para un efecto más gráfico y esperando mostrar con mayor calidad lo que se esta haciendo.

4.4.2 Prueba de perturbaciones

Para comprobar el desempeño del péndulo y tomando en cuenta que cualquier sistema está sujeto a perturbaciones, se probó la capacidad de las funciones de membresía para responder ante una perturbación ocasionada intencionalmente. Como se muestra en la Figura 4.8. Una perturbación real podría llegar a ser una ráfaga de viento, o variaciones de voltaje indeseadas.

Para este caso de estudio, la perturbación fue provocada “golpeando” el péndulo con la mano ocasionando así que los valores se dispararan tanto el de entrada como el de salida; sin embargo regresaron a la normalidad en un tiempo aproximado a los tres segundos. Con esto se comprobó que las reglas y las funciones de membresía eran las correctas ya que eran capaces de responder ante alguna eventualidad.

4.4.3 Prueba de tiempo de estabilización

Esta más que una prueba solo se realizo para ver el tiempo que le toma al péndulo llegar a la estabilidad. Es decir que tan confiable es el sistema y ver en cuanto tiempo llega a ser estable.

La Figura 4.9 muestra el tiempo que le toma al sistema estabilizarse desde que se pone el carro sobre el riel estando la varilla en un ángulo aproximado a los 90°. Se puede observar en la gráfica que el péndulo tarda alrededor de 7 segundos en llegar a un estado estable y así llega a mantenerse por tiempo indefinido

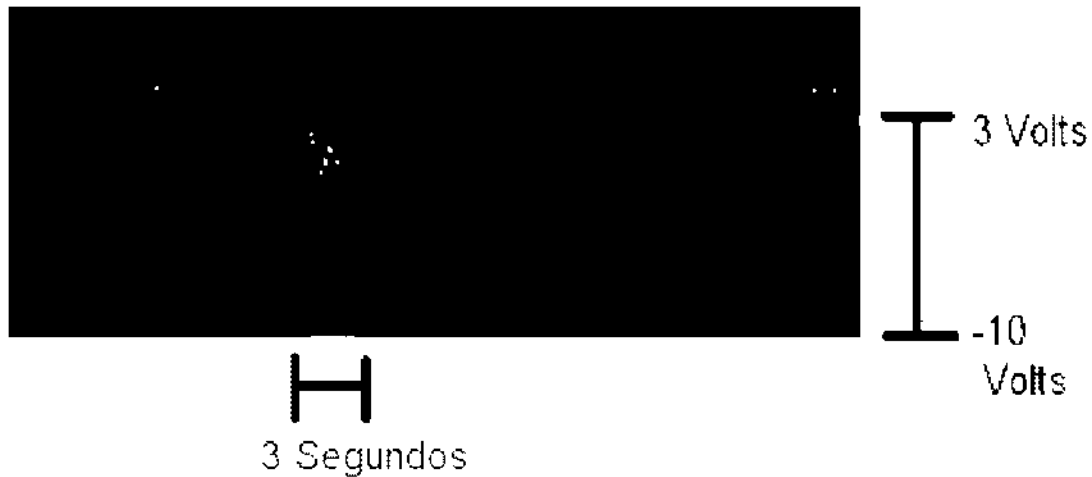


Figura 4.8 Gráfica de respuesta ante una perturbación del sistema.

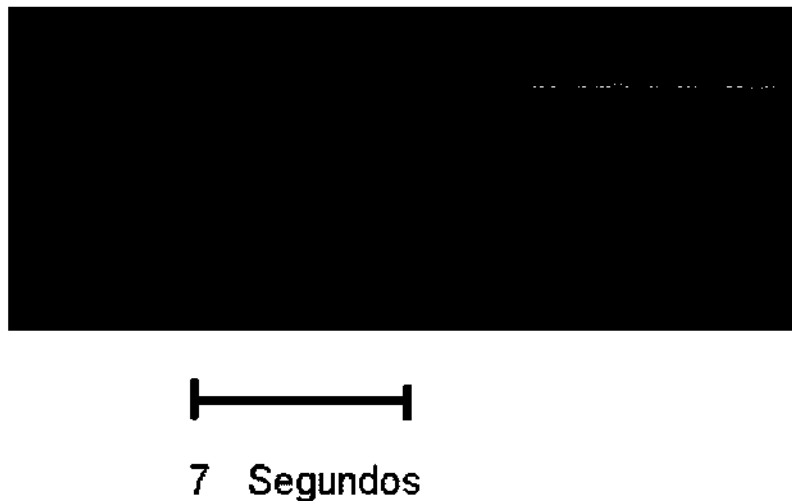


Figura 4.9 Gráfica de cuanto tiempo le toma al péndulo estabilizarse en su puesta a inicio.

4.5 Pruebas con otras funciones de membresía

Para comparar la eficiencia del controlador lógico difuso y mostrar que no es la única solución la aquí presentada, además con las reglas desarrolladas se programo el microcontrolador con otras funciones de membresía. Siendo el punto de comparación los

tiempos y formas de respuesta. Nuevamente se tomaron las gráficas en los tres estados, es decir: puesta a inicio, estado estable y respuesta ante una perturbación.

Las funciones de membresía usadas para el ángulo, fueron 7 y se muestran en la Figura 4.10. Para el control del carro se implementaron las mismas que en el caso anterior para de esa manera proteger al sistema.

Las gráficas muestran un comportamiento en el sistema parecido al obtenido con las funciones de membresía anteriores. Pero se observa que el péndulo tiende a desplazarse más tiempo lateralmente que a oscilar. Lo cual indica que no es un control tan fino como el que ya se había aplicado. A continuación se muestra en la Tabla 4.5 la relación entre estas funciones de membresía y los valores reales.

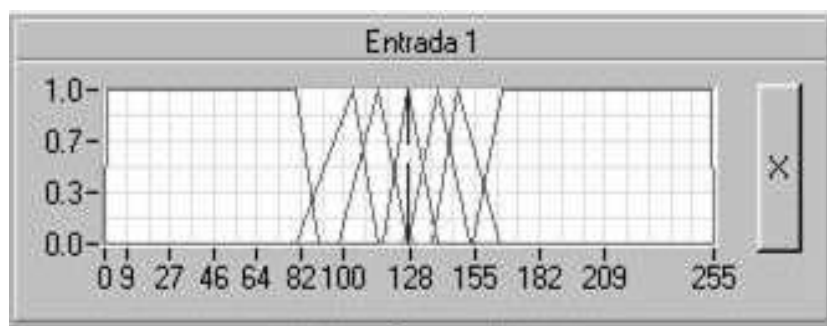


Figura 4.10 Funciones de membresía usadas para hacer las pruebas por segunda vez.

En la Figura 4.11 se observa la gráfica de puesta a inicio. En ella se observa que tarda alrededor de 5 segundos para lograrlo y en la Figura 4.12 se muestra el sistema en estado estable

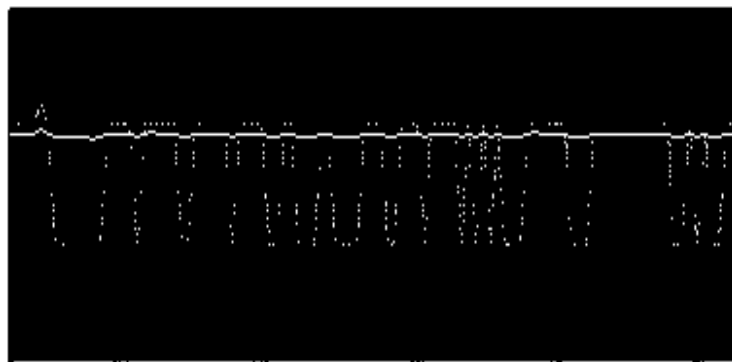
Tabla 4.5 Relación entre los ángulos y los valores reales del controlador.

Funciones de Membresía	Valor real del ángulo	Valor en el Microcontrolador
1	-45 a -70	0 a 84
2	-71 a -80	82 a 120
3	-81 a -87	100 a 128
4	-88 a +88	120 a 136
5	87 a 81	128 a 137
6	80 a 71	135 a 172
7	70 a 45	155 a 255



5 Segundos

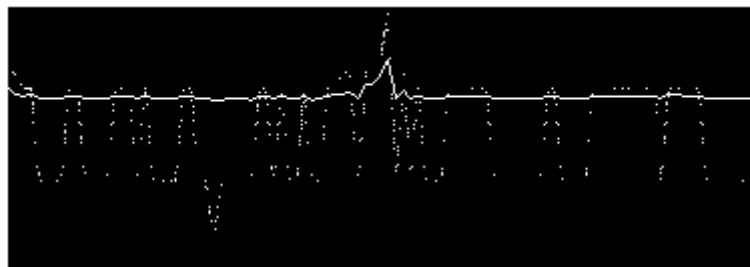
Figura 4.11 Gráfica de puesta a inicio.



-2.6 Volts
+2.6 Volts

Figura 4.12 Gráfica de estado estable.

La gráfica de la Figura 4.13, muestra la respuesta del sistema ante una perturbación. La perturbación tuvo una duración aproximada de 3 segundos disparando los voltajes de salida hasta un extremo para después estabilizarse rápidamente y seguir funcionando sin problema.



3 Segundos

Figura 4.13 Gráfica de respuesta ante una perturbación

4.6 Conclusiones

En este Capítulo se desarrollaron las pruebas para comprobar que el sistema funciona de la forma deseada. En las pruebas de perturbación se tomaron las impresiones de pantalla de LabWindows. En la primera prueba se aplicó una fuerza a la varilla hacia el lado izquierdo, mientras que con el segundo juego de funciones de membresía se empujó hacia la derecha.

Se comprobó con dos conjuntos de funciones de membresía que se puede mantener el sistema en un estado estable. Se hizo la comparación entre ambas funciones mostrando que cada una tiene sus ventajas y desventajas sobre las otras lo cual indica que puede haber muchas formas distintas de controlar el mismo proceso o sistema.

Se da una descripción de las funciones de membresía usadas y se demuestra que la interfaz entre el módulo de control y de la PC funciona de manera adecuada. Lo cual nos hizo posible la obtención de las distintas gráficas presentadas en este Capítulo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES GENERALES

5.1 Conclusiones del proyecto

Durante la realización de este proyecto de Tesis se puede llegar a la conclusión de que la lógica difusa es un método bueno para el control de sistemas lineales y no lineales como es el caso de esta Tesis en los cuales los controladores PID no son fáciles de implementar y tienden a tener fallas como son los casos en que aparecen comportamientos que no son lineales o que contienen variaciones en el entorno.

Se demostró que la lógica difusa es una manera de automatizar procesos sin el uso de ecuaciones matemáticas complejas y con un buen desempeño de funciones de membresía al igual que de reglas que controlen el sistema, éste operará en óptimas condiciones.

La interfaz gráfica utilizada resulta de gran ayuda para visualizar de una manera amigable el desenvolvimiento del sistema en tiempo real y también para poder monitorear la respuesta de salida y los valores de entrada al sistema.

Las características de funcionamiento de la implementación aquí descrita fueron satisfactorias, dado que el sistema llega y se mantiene en equilibrio bajo diferentes condiciones iniciales y también responde ante la presencia de perturbaciones en el sistema, como se mostró en las pruebas realizadas.

Las operaciones requeridas para implementar un algoritmo de lógica difusa se pueden simplificar suficientemente, como para ser implementadas en un microcontrolador de 8 bits. Los requerimientos de memoria son pequeños y el tiempo de ejecución para cada ciclo de control usando un microcontrolador es suficientemente para satisfacer la mayoría de aplicaciones en tiempo real.

Podemos recapitular que la manera en la cuál fue resuelto el sistema no es la única forma de resolverlo. Las funciones de membresía y las reglas que se usaron no son las únicas, pueden existir otras que lo llegaran a estabilizar en un tiempo menor o quizás exista

otra forma de atacar el problema buscando el error y la diferencia de error para ordenar las salidas. Puede haber una infinidad de posibilidades y de reglas para controlar el mismo sistema. La lógica difusa puede brindar muchas soluciones de acuerdo al diseñador y es una solución válida y no una sola como los modelos matemáticos que tienden a ser exactos.

La aportación de este proyecto es el tener un sistema de control implementado con un microcontrolador usando la lógica difusa para controlar un sistema considerado como un clásico en el ambiente de control. Ya que se trata de un problema antiguo que se ha resuelto de muchas maneras.

Los trabajos futuros podrían ser, el de hacer un sistema mínimo de la fuente de alimentación del módulo del péndulo invertido para que sea portable. Otro sería el de simular el sistema usando algún programa de simulación como MATLAB. Esto para comparar los tiempos de estabilización y la respuesta ante perturbaciones.

APÉNDICE

Video del Péndulo Invertido funcionando con el controlador de Lógica Difusa :

<http://www.youtube.com/watch?v=iJAEVRc8rcw>

Controlador de lógica difusa

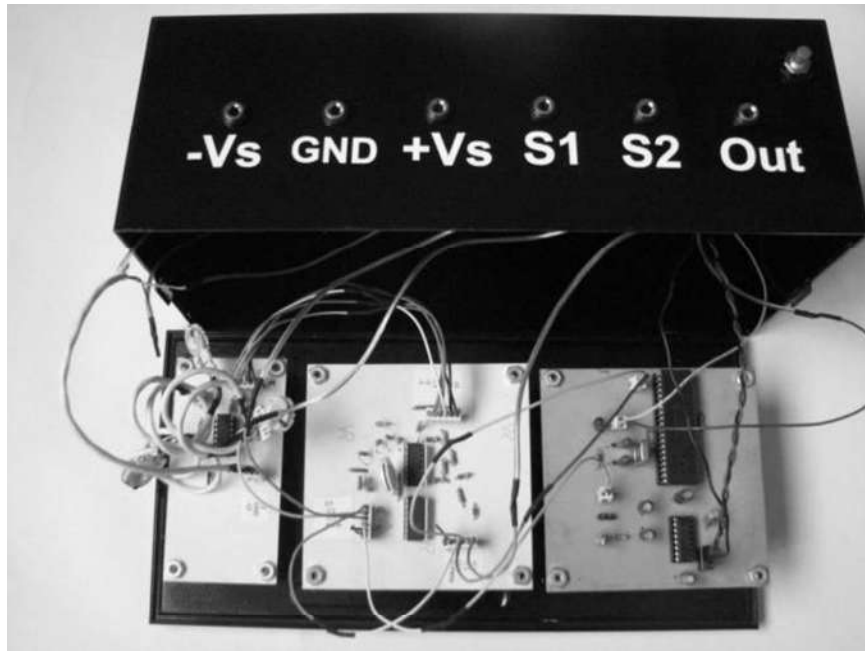


Figura A-1 Fotografía del controlador de lógica difusa

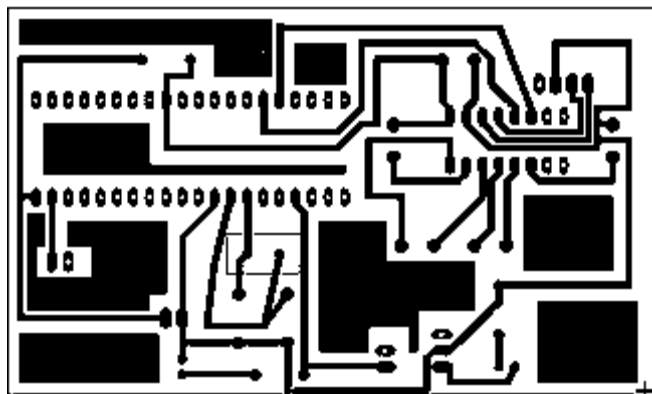


Figura A-2 Diseño del circuito impreso del controlador principal

Acopladores de Señal para Entradas, Salidas y Alimentación

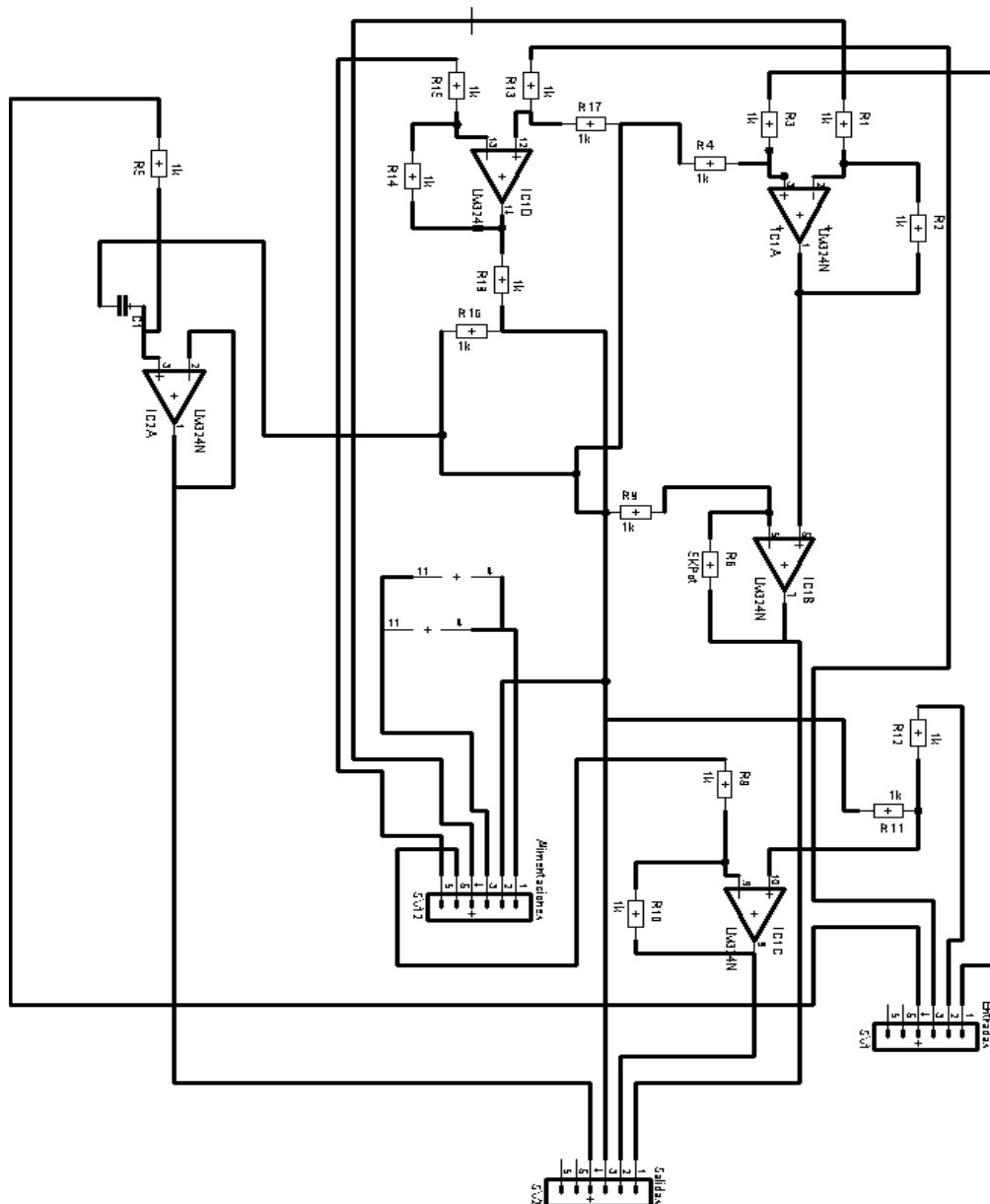


Figura A-4 Circuito esquemático de los acopladores de señal

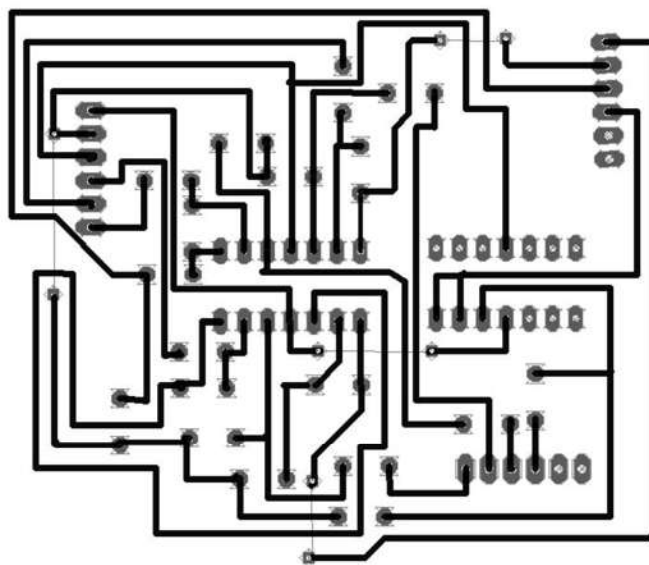


Figura A-5 Circuito impreso de los acopladores de señal

Acopladores para la fuente de alimentación

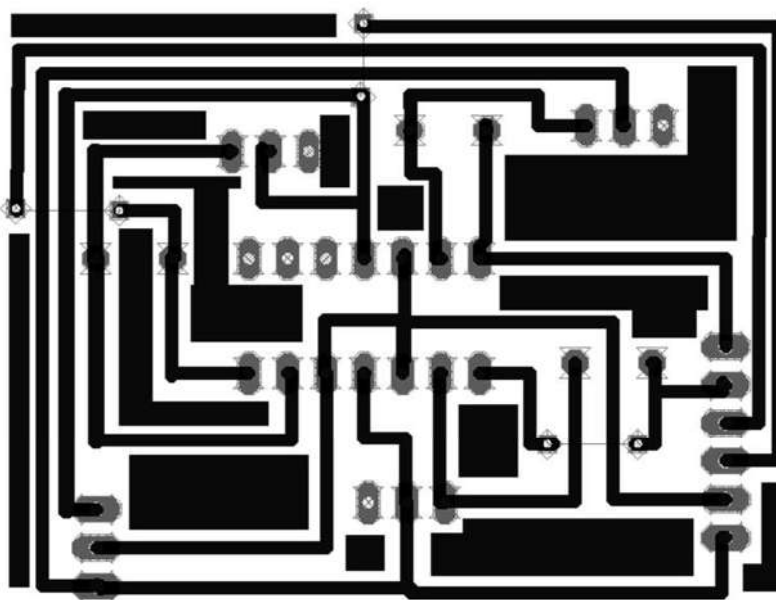


Figura A-6 Circuito impreso de las fuentes de alimentación

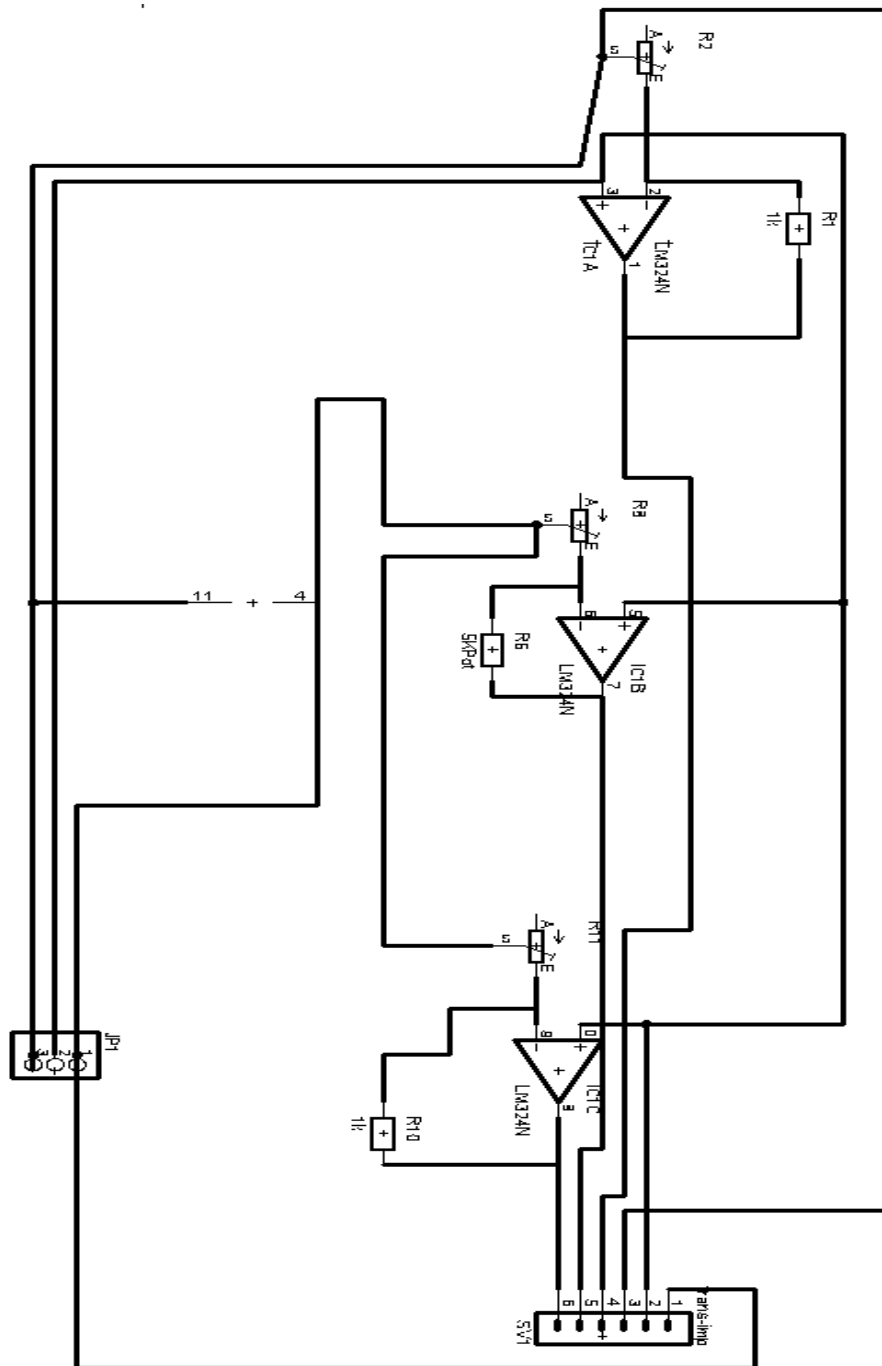


Figura A-7 Acopladores para las fuentes de alimentación

BIBLIOGRAFIA

[1] Zadeh, Lofti A., **Fuzzy Sets and Applications, Selected Paper**, John Wiley and Sons Inc., USA, 1987.

[2] Zimmermann, H. J., **Fuzzy set Theory**, Kluwer Academic Publishers, USA, 1991.

[3] www.quanser.com,

[4] Microchip PIC16F87X Data Sheet,

[5] Web: www.microchip.com.

[6] Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, **Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales**, Prentice Hall 1993

[7] Antonio Perence Junio, **Amplificadores operacionales y filtros activos**, Mc Graw Hill, 1991

[8] Alberto Guzmán Cervantes, Tesis UMSNH Facultad Ingeniería Eléctrica, **Modulo de control de lógica difusa implementado en microcontroladores PIC**, UMSNH 2005

[9] <http://prof.usb.ve/montbrun/ps2320/fuzzy/fuzzy.html>

[10] http://www.imse.cnm.es/Xfuzzy/Xfuzzy_3.0/Xfuzzy3.0_sp.pdf

[11] <http://www.fuzzytech.com/>