



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDO CON
LOGICA DIFUSA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICO ELECTRONICO
(AREA: ELECTRONICA)

P R E S E N T A

JAVIER TELLEZ SANCHEZ



DIRECTOR: ING. ROBERTO MACIAS PEREZ

MEXICO, D.F.

FEBRERO, 2006

A mi amada Rosalba:

*Por ser como eres
cada vez más y más te quiero.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres por su incondicional apoyo y comprensión. A mis hermanas y hermanos por la constante motivación que me inspiraron.

Quiero agradecer muy sinceramente a mis profesores de la Facultad, especialmente a los ingenieros Alejandro Sosa Fuentes, Eduardo Ramírez Sánchez, Roberto Macías Pérez, a los maestros en ingeniería Antonio Salvá Calleja y Francisco Rodríguez Ramírez, quienes hicieron una lectura crítica de esta tesis y por ofrecer muchos comentarios valiosos, los cuales se incluyeron en este trabajo.

Quiero agradecer a mis amigos Adrián, Blanca, Horacio, Viviana, Federico, Beatriz, Juan Carlos, Carla, Víctor, Clara, Jesús, Alma Rosa y Angélica por su invaluable apoyo y agradable compañía.

Por último quiero agradecer a todas y a cada una de las personas que me apoyaron durante el proyecto, en particular al ingeniero Lauro Santiago Cruz e Israel Nava a quienes admiro y tengo en gran aprecio.

*Javier Téllez Sánchez
Febrero, 2006*

INDICE

Capítulo I Introducción	1
Capítulo II Definición del problema	3
2.1 Motivaciones para realizar el proyecto	3
2.2 Problema	3
2.3 Objetivos	4
Capítulo III Nociones básicas de sistemas hidráulicos	5
3.1 Definiciones	5
3.2 Propiedades de los fluidos	6
3.3 Leyes básicas de los fluidos	6
3.4 Introducción a sensores de nivel de líquido, válvulas y motores de bombeo	8
Capítulo IV Lógica difusa	11
4.1 Introducción a la lógica difusa	11
4.2 Conjuntos difusos	12
4.2.1 Características de los conjuntos difusos	14
4.2.2 Operaciones con conjuntos difusos	16
4.2.3 Principio de extensión	17
4.2.4 Relaciones entre conjuntos difusos	18
4.2.5 Operaciones con relaciones difusas	19
4.2.6 Composición	19
4.3 Cálculo proposicional	20
4.4 Razonamiento aproximado	21
Capítulo V Introducción a la teoría de control difuso	22
5.1 Control difuso	22
5.1.1 Difusión	23
5.1.2 Evaluación de reglas	24
5.1.3 Desdifusión	24
5.2 Acciones básicas de control	28
5.3 Controlador difuso PD	28
5.4 Controlador difuso P+I	29
5.5 Controlador difuso PD+I	29
Capítulo VI Componentes del sistema de control	31
6.1 Características del PIC18F452	32
6.2 Sensor de nivel de líquido	33
6.3 Teclado	33
6.4 El módulo LCD	34
6.5 Válvulas de control	36

6.6 Etapa de potencia para activar la bomba de agua	38
Capítulo VII Diseño del controlador difuso PD+I	39
7.1 Desarrollo	39
7.2 Codificación del algoritmo de control difuso	44
7.2.1 Rutina de difusión	45
7.2.2 Rutina de evaluación de reglas	51
7.2.3 Rutina de desdifusión	53
Capítulo VIII Simulaciones en MATLAB	55
8.1 Simulación del controlador difuso en MATLAB	55
8.2 Función de transferencia de la planta	58
8.3 Simulación del sistema de control de nivel de líquido en SIMULINK	62
8.4 El controlador difuso contra el controlador analógico	64
Capítulo IX Resultados y conclusiones	68
9.1 Resultados	68
9.2 Conclusiones	71
APENDICE A Datos experimentales	72
APENDICE B Ejemplo de sintonización	78
APENDICE C Programa de control difuso	81
APENDICE D Diagramas	86
APENDICE E Hojas de datos	91
BIBLIOGRAFIA	107

CAPITULO I

INTRODUCCION

En algunos procesos industriales a menudo se incluyen sistemas de nivel, los cuales constan de tanques, conectados por medio de tubos con orificios, válvulas y dispositivos que restringen el flujo. En los sistemas de nivel de líquido, la medición y el control del nivel son de gran importancia, ya que disminuyen costos y aumentan la seguridad. Por ejemplo, si en un tanque el nivel de líquido es muy alto puede alterar el equilibrio de la reacción o causar el derrame de material peligroso o de valor. En caso contrario un nivel de líquido demasiado bajo altera el equilibrio de la reacción, modificando la calidad y eficiencia del proceso.

En algunos procesos, el nivel debe mantenerse con exactitud a una altura determinada, independientemente de las condiciones de carga del proceso. Por ejemplo, en un generador de vapor, como un boiler, es deseable mantener el nivel dentro de un valor determinado entre dos condiciones de operación presentes todo el tiempo, sin tener en cuenta la salida del generador.

En evaporadores, el medio caliente puede estar dentro de un tubo y este debe estar sumergido a una profundidad óptima. Un nivel muy bajo puede descubrir la superficie caliente, lo cual disminuye la eficiencia del proceso y causa sobrecalentamiento. Un nivel de líquido muy alto necesita una mayor entrada de calor.

La utilización del control de nivel puede ser ventajosa para mantener la capacidad del proceso entre límites prácticos. Al utilizar la medición y el control de nivel, el tamaño de los contenedores de mezclado o de reacción puede ser pequeño. Una vez que el controlador de nivel suministra el fluido necesario para mantener la altura del líquido en un nivel determinado, no es necesario utilizar grandes contenedores para manejar todo el líquido disponible para un proceso, Esto también significa que en algún instante una pequeña cantidad de material esta bajo reacción o en proceso reduciendo riesgos, pérdidas potenciales y putrefacción.

También, para proteger una bomba centrífuga, el nivel de líquido en el tanque de almacenamiento debe mantenerse en un valor óptimo. Si el nivel es demasiado bajo puede ocurrir cavilación en la succión de la bomba. Si el nivel es muy alto entonces puede haber pérdidas en el volumen del acumulador, afectando al proceso desde el punto de vista de operación.

Por esta razón se pueden justificar la medición y el control de nivel en términos de economía y seguridad.

Para medir el nivel de líquido se pueden utilizar instrumentos de medida directa, instrumentos basados en el desplazamiento, instrumentos basados en la presión hidrostática o en las características eléctricas del líquido.

Para controlar un sistema de nivel de líquido, se utiliza una o más de las técnicas mencionadas anteriormente para la medición del nivel y sistemas de control automático (analógicos o digitales), con el fin de abrir o cerrar válvulas y encender o apagar motores de bombeo.

Los sistemas de nivel de líquido forman parte de los sistemas hidráulicos. El modelo matemático de éstos es, en general, de naturaleza no lineal. Para el control de este tipo de sistemas, se puede aplicar la teoría de control analógico, digital o difuso.

En general, para aplicar la teoría de control analógico o digital, se requiere el modelo matemático lineal del sistema.

Al utilizar la lógica difusa para diseñar un controlador, no se requiere el modelo matemático del sistema, sino que se requiere del sentido común del diseñador o la experiencia del operador para automatizarlo.

Cada vez se utiliza con mayor frecuencia el control difuso porque tiene algunas ventajas con respecto a los sistemas de control tradicionales:

- Pueden diseñarse con mayor rapidez.
- Su desarrollo es más económico.

Algunas desventajas que presenta el control difuso son:

- Requiere mayor simulación, depuración y pruebas antes de ponerlos a operar.
- El número de reglas puede ser muy grande si se incrementa el número de entradas o el número de conjuntos por entrada.

DEFINICION DEL PROBLEMA

2.1 Motivaciones para realizar este proyecto

Los sistemas de control de nivel de líquido se utilizan para llenar o vaciar recipientes a un nivel definido. Estos recipientes pueden contener sustancias como: refresco, agua, leche, productos químicos, etc. Parte de las ganancias o pérdidas monetarias de estas industrias dependen del manejo de sus materiales.

Aplicar la teoría de control difuso para controlar un sistema de nivel de líquido dado. Con base en los resultados obtenidos, se puede analizar la posibilidad de mejorar la eficiencia y confiabilidad de este tipo de controles, con las ventajas intrínsecas que conllevan, entre ellas por un lado el ahorro de tiempo y dinero en la implantación de la tecnología y por otro el mayor aprovechamiento de los recursos de la empresa.

Pienso que es importante despertar interés por la investigación, desarrollo y aplicación de prototipos con control difuso para las industrias del país y en usos domésticos.

2.2 Problema

En la figura 2.1 se muestra un sistema de control de nivel de líquido. El sistema consta de un tanque cilíndrico de área A y altura H , un deposito, una bomba de agua y dos llaves VA y VB. Se requiere diseñar un controlador difuso que regule el llenado o vaciado del tanque a un nivel de referencia h especificado por el usuario.

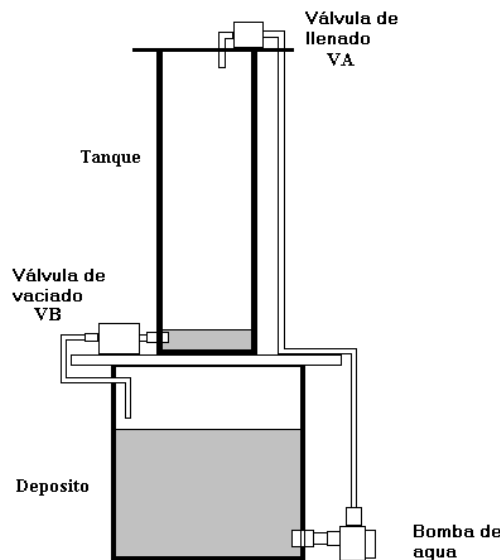


Figura 2.1 Sistema de nivel de líquido a controlar.

2.3 Objetivos:

Diseñar un sistema de control difuso, que sea capaz de controlar el nivel de líquido, en un sistema formado por dos tanques, dos válvulas de control y una bomba de agua, como el que se muestra en la figura 2.1.

Comparar, por medio de una simulación en MATLAB, la respuesta del sistema de nivel de líquido, utilizando el controlador difuso diseñado, con respecto a la respuesta obtenida mediante un controlador analógico.

Construir físicamente el sistema de nivel de líquido y el controlador difuso diseñado para comprobar su funcionamiento.

Mostrar una manera de programar el algoritmo de control difuso.

CAPITULO III

NOCIONES BASICAS DE SISTEMAS HIDRAULICOS

3.1 Definiciones

La *presión* se define como fuerza normal por unidad de área que actúa sobre las fronteras de un sistema. La presión absoluta se calcula como:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} \left[N / m^2 \right]$$

donde

P_{atm} es la presión atmosférica

P_{man} es la presión manométrica

$$1 \left[\frac{N}{m^2} \right] = 1 [Pa]$$

Una *presión manométrica* es la diferencia entre la presión absoluta del fluido y la presión atmosférica.

Se define el *número de Reynolds* como $R = \frac{\rho v D}{\mu}$

donde:

v es la velocidad promedio del fluido

ρ Es la densidad del fluido

D es una longitud

μ Es la viscosidad dinámica

Si $R < 200$ entonces, el flujo es laminar.

Si $R > 400$ entonces, no siempre el flujo es turbulento.

El flujo de un fluido es estable cuando la presión, la velocidad, la densidad, la temperatura y factores similares no cambian con el tiempo.

Una *línea de corriente* es una línea continua tendida a través del fluido de modo que tenga la dirección del vector de velocidad en cada punto.

Un *tubo de corriente* es el tubo hecho con todas las líneas de corriente que pasan por una curva dada.

El *volumen de control* se refiere a una región en el espacio definida para realizar el análisis de situaciones donde el flujo ocurre adentro y afuera del espacio.

3.2 Propiedades de los fluidos

La *densidad* ρ de una sustancia se define como masa por unidad de volumen. Las unidades comúnmente usadas son Kg / m^3 .

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

El *peso específico* γ de una sustancia se define como su peso por unidad de volumen.

$$\gamma = \rho g \left[\frac{N}{m^3} \right]$$

La *densidad específica* de una sustancia es la relación de su peso con respecto al peso de un volumen igual de agua a la presión atmosférica y temperatura estándar de 4°C.

La *viscosidad*, es una medida de la resistencia del fluido. Puede ser:

$$\text{Viscosidad} \begin{cases} \text{Dinámica} & \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] \\ \text{Cinemática} & \nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right] \end{cases}$$

Las fuerzas que afectan al flujo de los fluidos son principalmente la inercia y la viscosidad.

3.3 Leyes básicas de los fluidos

Las ecuaciones de continuidad se obtienen aplicando el principio de conservación de la masa del flujo. Este principio establece que la masa dentro de un sistema permanece constante con el tiempo. Por ejemplo, al aplicar el principio de conservación de la masa a dos secciones transversales a lo largo del tubo de corriente, en flujo estable, mostrado en la figura 3.1 se obtiene

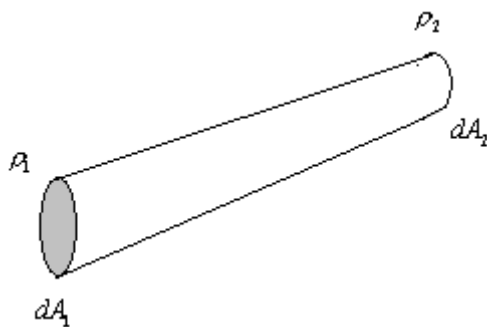


Figura 3.1 Tubo de corriente

$$m_1 - m_2 = C$$

$$\frac{dm_1}{dt} - \frac{dm_2}{dt} = 0$$

$$\text{Como } m = \rho V \text{ y } V = A l$$

$$\rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2$$

Donde m_1 y m_2 representan la masa de entrada y salida respectivamente.

dA_1 y dA_2 representan las diferenciales de área de entrada y salida.

v_1 y v_2 representan las velocidades del flujo de entrada y de salida.

En una colección de tubos de corriente si la densidad promedio de entrada y salida son ρ_1 y ρ_2 sobre las secciones transversales A_1 y A_2 respectivamente, y las velocidades promedio son sobre las secciones transversales de la entrada y la salida son V_1 y V_2 respectivamente, entonces

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

Si el flujo es estable e incompresible se tiene que $\rho_1 = \rho_2$. Por lo tanto,

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Las ecuaciones de continuidad para el volumen de control establecen que la razón del incremento con respecto al tiempo de la masa dentro de un volumen de control es igual a la razón de cambio neto de la masa que fluye hacia la masa de control. Por ejemplo, al aplicar el principio de conservación de la masa al tanque de la figura 3.2 se obtiene

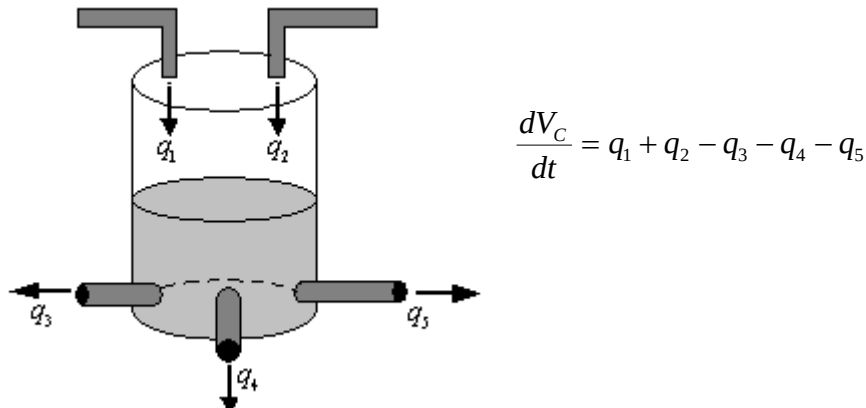


Figura 3.2 Tanque con varias entradas y salidas de líquido.

La *ecuación de Euler* del movimiento en flujo estable se escribe como

$$v dv + \frac{dp}{\rho} + g dz = 0$$

La *ecuación de Bernoulli* para flujo estable sin fricción e incompresible se obtiene al integrar la ecuación de Euler. Se escribe como

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = cte .$$

3.4 Introducción a sensores de nivel de líquido, válvulas y motores de bombeo

El sistema de nivel de líquido utilizado en este proyecto consta de los siguientes componentes: un tanque, un deposito, un sensor de nivel de líquido, dos válvulas de control y una bomba de agua.

Para medir el nivel de líquido se utilizan diferentes instrumentos, los cuales se clasifican de la siguiente manera

- Los instrumentos que miden directamente el nivel de liquido se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal y flotador.
- Los aparatos que miden la el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en: medidor monasterio, medidor de membrana, medidor de burbujeo y medidor de presión diferencial de diafragma.
- El medidor de desplazamiento a barra de torsión aprovecha el empuje producido por el propio líquido.
- Los instrumentos que utilizan las características eléctricas del líquido se clasifican en: medidor resistivo, conductivo, capacitivo, ultrasónico, de radiación y de láser.

Una *válvula* es un dispositivo que varía el caudal del fluido de control para modificar el valor de la variable medida. Sus componentes básicos son el cuerpo y el servomotor. Internamente el cuerpo contiene el obturador y el asiento. Para conectarla con el servomotor se utiliza una tapa a través de la cual atraviesa el vástago del obturador. Para evitar fugas de liquido entre la tapa y el vástago se utilizan empaques. Para conectar la válvula con la tubería externa se utilizan bridas o una conexión roscada o soldada.

Los *servomotores* que se utilizan en las válvulas pueden ser neumáticos, hidráulicos, digitales y electrónicos.

Los *servomotores neumáticos* consisten en un diafragma con resorte que trabaja entre dos límites de presión, para las cuales se tiene las posiciones extremas de la válvula. Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y continua moviéndose hasta que el diafragma llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte.

Los *servomotores hidráulicos* consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del controlador actúa sobre la servoválvula dirigiendo el flujo hidráulico a los lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante retroalimentación, la posición exacta de la válvula.

Las *válvulas digitales* disponen de compuertas neumáticas accionadas por electroválvulas, que a su vez son excitadas por la señal de salida binaria de un microprocesador.

Los *servomotores eléctricos* consisten en un motor eléctrico que se acopla al vástago de la válvula por medio de un tren de engranes. El motor eléctrico tiene como características principales su par y su velocidad, las cuales se reflejan en la rapidez de apertura y cierre de

la válvula. Los circuitos básicos de control para servomotores eléctricos son: todo-nada, proporcional y flotante.

Con respecto al movimiento del obturador, las válvulas se clasifican como válvulas de movimiento lineal y válvulas de movimiento circular.

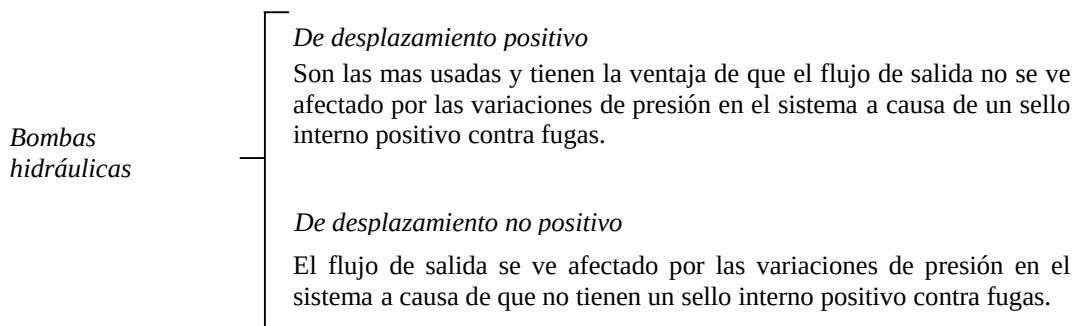
Las *válvulas de movimiento lineal* se clasifican como:

- *Válvula de globo* de simple asiento o de doble asiento.
- *Válvula de ángulo.*
- *Válvula de tres vías.*
- *Válvula de jaula.*
- *Válvula de compuerta.*
- *Válvula en Y.*
- *Válvula de cuerpo partido.*
- *Válvula Saunders.*
- *Válvula de compresión.*

Las válvulas un movimiento circular se clasifican como:

- *Válvulas de obturador excéntrico rotativo.*
- *Válvula de obturador cilíndrico excéntrico.*
- *Válvula de mariposa.*
- *Válvula de bola.*
- *Válvulas de orificio ajustable.*
- *Válvula de flujo axial.*

Una *bomba* es una maquina eléctrica que sirve para transportar fluidos por medio de tuberías. Se pueden clasificar de la siguiente manera



Las bombas de desplazamiento positivo se clasifican como

- Bombas de pistón axial.
- Bombas de pistón radial.
- Bombas de aspas.
- Bomba de engranes.

Las clasificaciones de las válvulas y de las bombas de agua realizadas anteriormente no son las únicas, pero sirven para dar una idea los tipos de válvulas y bombas que se pueden adquirir.

Para elegir una válvula de control existen más características de las mencionadas anteriormente ya que se debe tener en cuenta el tipo de fluido que se va a utilizar, el caudal requerido, la temperatura de operación y la característica de flujo entre otras.

LOGICA DIFUSA

La lógica difusa fue desarrollada por el Doctor Lotfi A. Zadeh en el año de 1965, en la Universidad de California, en Berkeley. Aunque en occidente se hicieron las primeras aplicaciones de control difuso en el ámbito industrial, su desarrollo tecnológico, en artículos de consumo, comenzó en Japón.

En la actualidad, la lógica difusa ha permitido el desarrollo de la inteligencia artificial, las redes neuronales, los algoritmos genéticos y la programación evolutiva en el campo de los procesos biológicos.

4.1 Introducción a la lógica difusa

La lógica difusa es un método de razonamiento aproximado que utiliza un conjunto de reglas de implicación de la forma **SI** < antecedente > **ENTONCES**, < consecuente >, las cuales se refieren a cantidades imprecisas, como ideas o palabras que se pueden trasladar a un lenguaje matemático formal que se puede programar. De esta forma las nociones como caliente, muy caliente, poco caliente, etc., pueden formularse matemáticamente y ser procesados por la computadora.

La lógica difusa se aplica en:

- El control de procesos industriales.
- La electrónica de entretenimiento y hogar.
- Sistemas expertos.
- Sistemas de diagnóstico.
- Sistemas de deducción automática.

Se puede aplicar en:

- Sistemas complejos donde es difícil o imposible obtener un modelo.
- Sistemas controlados por expertos.
- Sistemas que utilizan observaciones como reglas básicas.
- Cualquier sistema que no requiera gran exactitud para ser controlado.

Ventajas:

- Usa variables lingüísticas para simular el conocimiento humano.
- Es un sistema basado en reglas que relacionan las salidas con las entradas, a diferencia de los sistemas tradicionales que se basan en ecuaciones.
- Es posible obtener prototipos rápidamente al ser sencillos de diseñar.
- El desarrollo de estos es mas barato que el de sistemas convencionales.

Desventajas:

- Requieren mayor simulación y mayor cantidad de pruebas para ir eliminando errores antes de ponerlos a funcionar.

4.2 Conjuntos difusos

Al conjunto de todos los elementos que definen el rango de la aplicación se le llama universo de discurso. Para representarlo se utiliza la letra X mayúscula y para representar sus elementos individuales se utiliza la letra x minúscula.

Un conjunto clásico, también llamado tradicional, exacto o definido, es una colección de elementos del universo X . Los conjuntos se representan generalmente con las primeras letras del abecedario A, B, C, D , etc.

Para establecer las relaciones entre elementos y conjuntos o entre conjuntos se utiliza la siguiente notación

$x \in X \rightarrow x$ pertenece a X

$x \in A \rightarrow x$ pertenece a A

$x \notin X \rightarrow x$ no pertenece a A

Para los conjuntos A y B en X se tiene

$A \subset B$ A es subconjunto de B

$A \subseteq B$ A es subconjunto propio de B

$A = B$ $A \subseteq B$ y $B \subseteq A$

$\emptyset$ Representa al conjunto que no tiene elementos

X Representa al conjunto de todos los elementos

En general, los conjuntos se pueden representar por medio de un plano cartesiano, un diagrama de Venn-Euler o una expresión matemática. En la figura 4.1 se muestran las diferentes representaciones de un conjunto tradicional.

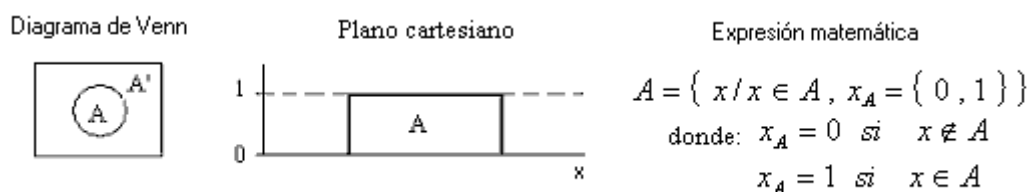


Figura 4.1. Representaciones de un conjunto tradicional o exacto.

En el caso de los conjuntos tradicionales, los elementos que los forman se encuentran exactamente definidos en cuanto a su pertenencia al conjunto. Algunos ejemplos de conjuntos clásicos son:

1. El conjunto de planetas que forman el sistema solar. Este es un conjunto finito de 9 elementos, el cual puede representarse de la siguiente manera

$$A = \{ x / x \text{ es un planeta del sistema solar} \}$$

2. El conjunto de números mayores que cero y menores que 5. Este es un conjunto infinito el cual se puede representar como

$$A = \{x / 0 < x < 5\}$$

Cada uno de estos conjuntos tiene un límite bien definido, es decir, no existe ninguna duda de la pertenencia o no-pertenencia de un elemento a su conjunto. Formalmente, la pertenencia de cada elemento de un universo a un conjunto se define mediante una función característica, la cual se define de la siguiente manera:

Sea x un elemento definido en el conjunto universal X y A un subconjunto de X , entonces la pertenencia del elemento x al conjunto A estará dada por la función característica

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si y sólo si } x \in A \\ 0 & \text{si y sólo si } x \notin A \end{cases}$$

donde $\mu_A(x)$ representa una función de mapeo del universo X al universo Y de elementos $\{1,0\}$.

Con esta definición no se pueden asignar grados de membresía intermedios, que representen conceptos que no estén bien definidos. Se puede representar matemáticamente a los conjuntos temperatura, presión, humedad, nivel, etc. Pero, qué pasa si se requiere representar, matemáticamente al conjunto de nivel líquido pequeño, mediano o grande de un tanque con agua. ¿Cómo se representarían matemáticamente los conceptos pequeño, mediano o grande?. Evidentemente existe un grado de inexactitud o ambigüedad en este tipo de conjuntos. Con la teoría clásica de conjuntos no es posible hacer una representación matemática de fenómenos con niveles de incertidumbre.

En la lógica difusa, al igual que en los conjuntos clásicos, el universo de discurso, que representa todos los conjuntos difusos, se representa con la letra X y los elementos individuales del universo se representan con la letra x . Se define a un conjunto difuso en X , como una colección de elementos que no tienen límite exacto o definido, mientras que en los conjuntos clásicos la transición, entre la pertenencia y no-pertenencia a un conjunto de un elemento del universo es abrupta y definida.

Un conjunto difuso se representa por el símbolo del conjunto y una tilde subescrita. Por ejemplo, $\tilde{A}$ representa al conjunto difuso A . Los elementos de un conjunto difuso se mapean a un conjunto de valores reales en el intervalo $[0, 1]$.

Si un elemento x del universo de discurso es miembro del conjunto $\tilde{A}$, entonces, la función de mapeo para un conjunto difuso está dada como $\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0, 1]$, donde

$$\tilde{A} = \{ x, \mu_{\tilde{A}}(x) / x \in X \}$$

La forma de representar a los elementos de un conjunto difuso es por medio de pares ordenados, formados por el elemento del conjunto y su grado de pertenencia a este, es decir $(x, \mu_A(x))$ representa un elemento x del conjunto difuso $\tilde{A}$. En la figura 4.2 se muestran las diferentes representaciones de un conjunto difuso.

Figura 4.2. Representación de un conjunto difuso.



Para facilitar la representación de los conjuntos difusos, cuando el universo de discurso X es discreto y finito, se utiliza la siguiente notación:

$$\tilde{A} = \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_n)}{x_n}$$

En la notación anterior el símbolo barra horizontal “/” no significa división aritmética, sino que es un símbolo delimitador que relaciona a cada elemento del conjunto con su grado de pertenencia. El símbolo “+” significa unión difusa para conjuntos discretos.

4.2.1 Características de los conjuntos difusos

Toda la información contenida en un conjunto difuso se describe por su función de pertenencia. Sus características básicas son el *soporte*, el *núcleo* y los *límites*.

Soporte “ $\text{Supp } \tilde{A}$ ”. Comprende todos los elementos x del universo para los cuales la función de membresía del conjunto $\tilde{A}$ es mayor que cero.

$$\text{Supp } \tilde{A} = \{ x \in X / \mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \}$$

Límite. Comprende todos los elementos x del universo para los cuales la función de membresía tiene un valor de pertenencia entre cero y uno al conjunto $\tilde{A}$, es decir,

$$0 < \mu_{\tilde{A}}(x) < 1$$

Núcleo. El núcleo de un conjunto difuso $\tilde{A}$ es la región del universo que tiene pertenencia total al conjunto, es decir, $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$.

En la figura 4.3 se muestra las características básicas de un conjunto difuso.

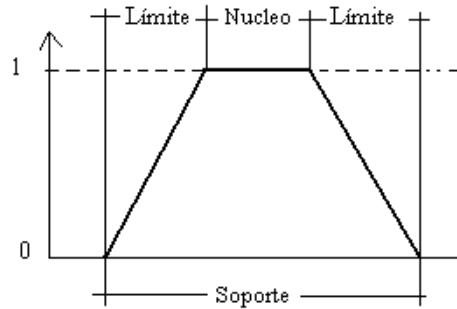


Figura 4.3 Características básicas de un conjunto difuso

Un conjunto difuso se dice que es normal si por lo menos uno de sus elementos presenta un grado de pertenencia de valor igual a 1.

Se dice que $\tilde{A}$ es subconjunto de $\tilde{B}$ si y solo si el grado de pertenencia de $\tilde{A}$ es menor o igual que el de $\tilde{B}$.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x)$$

Un conjunto difuso $\tilde{A}$ es igual al conjunto difuso $\tilde{B}$ si sus funciones de pertenencia son iguales para todos los elementos de los conjuntos.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x)$$

Un conjunto difuso es vacío si tiene un soporte vacío, es decir, la función de pertenencia asigna cero a todos los elementos del conjunto.

Un conjunto difuso convexo se describe por una función de membresía cuyos valores de pertenencia se incrementan o decrementan estrictamente de forma monotonica. Es decir, si para todos los elementos del conjunto $\tilde{A}$ donde $x < y < z$ se cumple que

$$\mu_{\tilde{A}}(y) \geq \min[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{A}}(z)]$$

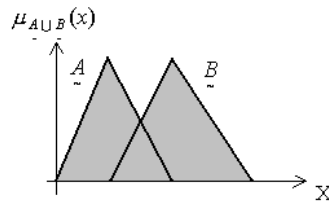
entonces se dice que $\tilde{A}$ es un conjunto difuso convexo.

4.2.2 Operaciones con conjuntos difusos

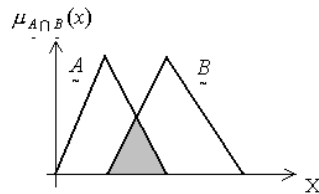
Las operaciones con conjuntos difusos se definen en términos de la función de pertenencia, ya que esta define completamente al conjunto difuso.

Con dos conjuntos difusos $\tilde{A}$ y $\tilde{B}$, definidos en el mismo universo de discurso X , se pueden realizar las siguientes operaciones difusas:

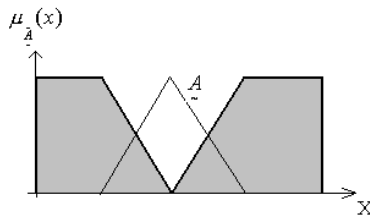
Unión. $\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \max [\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)]$



Intersección. $\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \min [\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)]$



Complemento. $\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)$

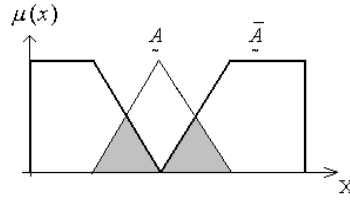


Leyes de DeMorgan.

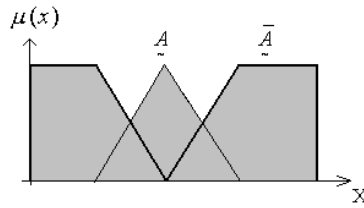
$$\overline{\tilde{A} \cap \tilde{B}} = \tilde{\tilde{A}} \cup \tilde{\tilde{B}}$$

$$\overline{\tilde{A} \cup \tilde{B}} = \tilde{\tilde{A}} \cap \tilde{\tilde{B}}$$

No cumplen con la ley del medio excluido: $\tilde{A} \cap \overline{\tilde{A}} \neq \emptyset$



No cumplen con la ley de la contradicción: $\tilde{A} \cup \overline{\tilde{A}} \neq X$



4.2.3 Principio de extensión

Este principio nos permite extender el dominio de una función en conjuntos difusos. Supongamos que hay una función de mapeo entre los elementos u , del universo U , sobre los elementos v , de otro universo V . Este mapeo se describe por: $f: U \rightarrow V$.

Sea $\tilde{A}$ un conjunto difuso del universo U esto es, $\tilde{A} \subseteq U$ y sea f una función que mapea al conjunto $\tilde{A}$ en el universo U a un conjunto $\tilde{B}$ en el universo V , donde

$$\tilde{A} = \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_1)}{u_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_2)}{u_2} + \dots + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_n)}{u_n}$$

Al aplicar el principio de extensión obtenemos la siguiente expresión

$$f(\tilde{A}) = f\left(\frac{\mu_{\tilde{A}}(u_1)}{u_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_2)}{u_2} + \dots + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_n)}{u_n} \right) = \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_1)}{f(u_1)} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_2)}{f(u_2)} + \dots + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_n)}{f(u_n)}$$

$$f(\tilde{A}) = \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_1)}{v_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_2)}{v_2} + \dots + \frac{\mu_{\tilde{A}}(u_n)}{v_n}$$

Se puede observar que los grados de pertenencia de los elementos de U al conjunto $\tilde{A}$ son iguales a los grados de pertenencia de los elementos del universo V al conjunto $\tilde{B}$.

4.2.4 Relaciones entre conjuntos difusos

El producto cartesiano de los universos de discurso X x Y se obtiene con la expresión

$$X \times Y = \{(x, y) / x \in X, y \in Y\}$$

La cual puede representarse en forma gráfica con un diagrama sagital o en un plano cartesiano y en forma analítica con una expresión matricial.

Por ejemplo, en la figura 4.4 se muestra el producto cartesiano entre $X=\{0, 1, 2, 3\}$ y $Y=\{a, b, c, d\}$.

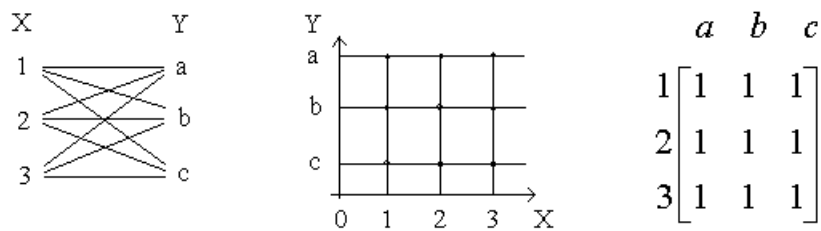


Figura 4.4 Representación del producto cartesiano de X y Y en forma sagital, en un plano cartesiano y en una expresión matricial.

Se puede observar que el producto cartesiano es un conjunto que relaciona a todos los elementos del universo X con cada elemento del universo Y .

Con dos conjuntos difusos $\tilde{A}$ y $\tilde{B}$ definidos en los universos de discurso X y Y respectivamente, se puede obtener el producto cartesiano de ambos conjuntos difusos. La fuerza de la relación se mide con la función de membresía $\mu_{\tilde{R}}(x, y)$, la cual representa una función de mapeo del producto cartesiano $X \times Y$ con el intervalo $[0, 1]$, donde:

$$\mu_{\tilde{R}}(x, y) = \mu_{\tilde{A} \times \tilde{B}}(x, y) = \min[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)]$$

Este producto cartesiano da la relación $\tilde{R}$ que hay entre los universos X y Y .

4.2.5 Operaciones con relaciones difusas

Como una relación difusa es también un conjunto difuso, se pueden aplicar todas las operaciones referidas a conjuntos difusos, es decir, con dos relaciones difusas $\tilde{R}$ y $\tilde{S}$ definidas en el espacio cartesiano $X \times Y$, se pueden realizar las siguientes operaciones:

Unión
$$\mu_{\tilde{R} \cup \tilde{S}}(x, y) = \max [\mu_{\tilde{R}}(x, y), \mu_{\tilde{S}}(x, y)]$$

Intersección
$$\mu_{\tilde{R} \cap \tilde{S}}(x, y) = \min [\mu_{\tilde{R}}(x, y), \mu_{\tilde{S}}(x, y)]$$

Complemento
$$\mu_{\tilde{R}^c}(x, y) = 1 - \mu_{\tilde{R}}(x, y)$$

Las operaciones de conmutatividad, asociatividad, involución e idempotencia se cumplen en relaciones difusas y también se cumplen las leyes de DeMorgan. La relación vacía 0 y la relación completa E son análogas al conjunto vacío y al conjunto total. Las operaciones que no se cumplen en relaciones difusas y en conjuntos difusos son las leyes del medio excluido

$$\tilde{R} \cap \tilde{R}^c \neq 0$$

$$\tilde{R} \cup \tilde{R}^c \neq E$$

4.2.6 Composición

Si tenemos tres universos de discurso diferentes X, Y y Z y tenemos una relación difusa $\tilde{R}$ que mapea los elementos de X con cada elemento de Y, y una relación difusa $\tilde{S}$ que mapea los elementos de Y con cada elemento de Z, entonces es posible utilizar la composición de relaciones difusas, la cual permite obtener una relación $\tilde{T}$ que mapea directamente los elementos del universo X con cada elemento del universo Z. De esta manera se trabaja con una relación en vez de dos relaciones. La composición difusa se define como:

Composición max-min

$$\tilde{T} = \tilde{R} \circ \tilde{S}$$

$$\mu_{\tilde{T}}(x, z) = \vee [\mu_{\tilde{R}}(x, y) \wedge \mu_{\tilde{S}}(y, z)]$$

Composición max-prod

$$\tilde{T} = \tilde{R} \bullet \tilde{S}$$

$$\mu_{\tilde{T}}(x, z) = \vee [\mu_{\tilde{R}}(x, y) \bullet \mu_{\tilde{S}}(y, z)]$$

La composición de relaciones no es una operación conmutativa, es decir $\tilde{R} \circ \tilde{S} \neq \tilde{S} \circ \tilde{R}$

4.3 Cálculo proposicional

Una proposición difusa es un concepto o pensamiento impreciso, al que se le asigna un grado de verdad en el intervalo de $[0,1]$. Las proposiciones difusas se asignan a conjuntos difusos. El grado de verdad de la proposición $\tilde{P}$, que está asignada al conjunto $\tilde{A}$, se determina con la expresión:

$$T(\tilde{P}) = \mu_{\tilde{A}}(x) \text{ donde } 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$$

es decir, el grado de verdad de la proposición $\tilde{P} : x \in \tilde{A}$ es igual al grado de pertenencia de x en $\tilde{A}$.

Los conectivos lógicos de negación, disyunción, conjunción e implicación están también definidos para la lógica difusa. Estos conectivos se muestran a continuación para dos proposiciones simples, donde $\tilde{P}$ está definida en el conjunto difuso $\tilde{A}$ y $\tilde{Q}$ está definida en el conjunto difuso $\tilde{B}$:

El grado de verdad de la negación de la proposición $\tilde{P}$ se calcula como

$$T(\bar{\tilde{P}}) = 1 - T(\tilde{P})$$

La disyunción $\tilde{P} \vee \tilde{Q}$, representa al conjunto difuso de los elementos x del universo de discurso, que están en el conjunto $\tilde{A}$ o en el conjunto $\tilde{B}$, donde el grado de pertenencia se calcula como

$$T(\tilde{P} \vee \tilde{Q}) = \max\left(T(\tilde{P}), T(\tilde{Q})\right)$$

La conjunción $\tilde{P} \wedge \tilde{Q}$, representa al conjunto difuso de los elementos x del universo de discurso, que están en el conjunto $\tilde{A}$ y en el conjunto $\tilde{B}$, donde el grado de pertenencia se calcula como

$$T(\tilde{P} \wedge \tilde{Q}) = \min\left(T(\tilde{P}), T(\tilde{Q})\right)$$

La implicación $\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q}$ establece que si el elemento x del universo de discurso X está en el conjunto $\tilde{A}$, entonces, el elemento y del universo de discurso Y está en el conjunto $\tilde{B}$. El grado de pertenencia de la implicación se calcula como

$$T(\tilde{P} \rightarrow \tilde{Q}) = T(\bar{\tilde{P}} \vee \tilde{Q}) = \max\left(T(\bar{\tilde{P}}), T(\tilde{Q})\right)$$

4.4 Razonamiento aproximado

El razonamiento aproximado es un método de razonamiento impreciso que permite utilizar conceptos vagos o imprecisos y consiste en representar por medio de símbolos las proposiciones iniciales y sus términos de enlace. A las formas lógicas obtenidas se les aplican reglas de inferencia para obtener una conclusión.

Los *términos de enlace de proposiciones* son las palabras «y», «o», «no», «si...», *entonces* y «si y solo si». En forma de símbolos se representan como « $\vee$ », « $\wedge$ », « $\neg$ », « $\rightarrow$ » y « $\leftrightarrow$ » respectivamente.

El término de enlace dominante en la proposición determina la forma lógica de esta. Las formas lógicas son la conjunción, la disjunción, la negación, la forma condicional y la forma bicondicional. Después de representar por medio de símbolos las proposiciones y de obtener la forma lógica de estas, se aplican las reglas de inferencia para obtener una conclusión, inferencia o deducción.

Una tautología es una proposición que es cierta, independientemente de las combinaciones de certeza de las proposiciones que la componen. Las reglas de inferencia se pueden convertir en implicaciones tautológicas para obtener conclusiones verdaderas, independientemente del valor de verdad de las premisas. A las reglas de inferencia convertidas en implicaciones lógicas se les llaman reglas de implicación. Algunas reglas de implicación son:

$$\begin{aligned}\text{Modus Ponendo Ponens (PP): } & \left[\underset{\sim}{P} \wedge (\underset{\sim}{P} \rightarrow \underset{\sim}{Q}) \right] \rightarrow \underset{\sim}{Q} \\ \text{Modus Tollendo Tollens (TT): } & \left[(\neg \underset{\sim}{Q} \wedge (\underset{\sim}{P} \rightarrow \underset{\sim}{Q})) \right] \rightarrow \neg \underset{\sim}{P} \\ \text{Silogismo hipotético (SH): } & \left[(\underset{\sim}{P} \rightarrow \underset{\sim}{Q}) \wedge (\underset{\sim}{Q} \rightarrow \underset{\sim}{R}) \right] \rightarrow (\underset{\sim}{P} \rightarrow \underset{\sim}{R})\end{aligned}$$

Por ejemplo, para la proposición si (El café está muy frío & (Si el café esta muy frío entonces calentar mucho el café)). Al aplicar la regla de implicación (PP) se concluye que se debe calentar mucho el café.

Para la proposición si (No calentar mucho el café & (Si el café esta muy frío entonces calentar mucho el café)). Al aplicar la regla de implicación (TT) se concluye que el café no está muy frío.

En cada ejemplo se requiere definir una función de pertenencia para describir los conceptos imprecisos *frío*, *muy frío* y *calentar mucho*, para poder realizar el cálculo proposicional correspondiente, el cual consiste en obtener el grado de verdad de cada una de las conclusiones.

INTRODUCCION A LA TEORIA DE CONTROL DIFUSO

5.1 Control difuso

El control difuso es el resultado de aplicar los conceptos de la lógica difusa a la teoría del control. A diferencia del control tradicional que requiere de un modelo matemático para describir el proceso y poder gobernarlo, el control difuso requiere de un conjunto de reglas. Estas reglas se basan en el conocimiento y experiencia en un proceso dado. De esta manera se obtiene la descripción lingüística del sistema que sustituye al modelo matemático.

El diagrama de bloques de un sistema de control difuso de lazo abierto y de lazo cerrado difieren de los tradicionales únicamente por el tipo de controlador que utilizan para comandar la planta o proceso. En la figura 5.1 se muestra un sistema de control difuso de lazo cerrado.

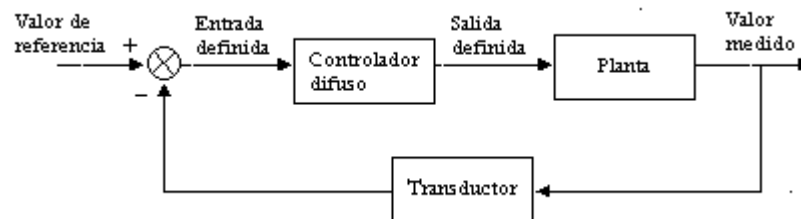


Figura 5.1 Esquema básico de control difuso de lazo cerrado.

El controlador difuso está formado básicamente por la base de conocimiento y la máquina de inferencia. La base de conocimiento contiene a los conjuntos difusos de entrada, las reglas y a los conjuntos difusos de salida. Básicamente contiene la información cualitativa del proceso, es decir contiene el modelo lingüístico del proceso.

En la máquina de inferencia se infieren las decisiones del controlador difuso para cada conjunto de entradas. Debido a que este tipo de controlador realiza un proceso de inferencia, se le llama control inteligente. Consta de los siguientes procesos: difusión, evaluación de reglas y desdifusión. En la figura 5.2 se muestra el diagrama de bloques de la estructura de un controlador difuso.

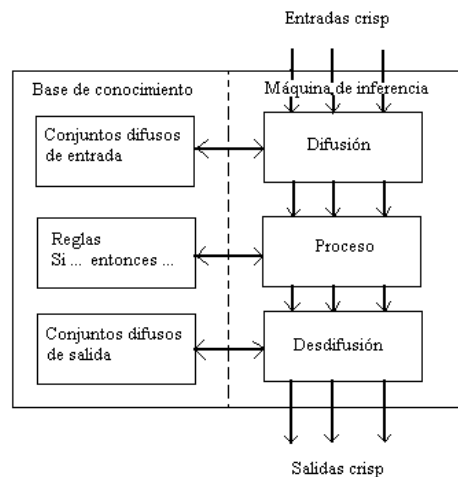


Figura 5.2 Estructura de un controlador difuso.

5.1.1 Difusión

La difusión es un proceso matemático, mediante el cual se calcula el valor de pertenencia de un valor definido a un conjunto difuso, es decir, un valor definido es transformado en un valor difuso. Para definir los conjuntos difusos de entrada al controlador, se utilizan los siguientes métodos: intuición, inferencia, ordenación por rango, redes neuronales, algoritmos genéticos, etc.

Para este proyecto se eligió el método de intuición, el cual consiste en definir el número y la forma de los conjuntos difusos de entrada con base al conocimiento que se tiene sobre la planta o proceso a controlar. Posteriormente se simula el sistema de control y se modifican los conjuntos de entrada hasta que se obtenga la respuesta deseada de la planta. La función de pertenencia de un conjunto difuso puede tener varias formas, algunas de estas se muestran en la figura 5.3.

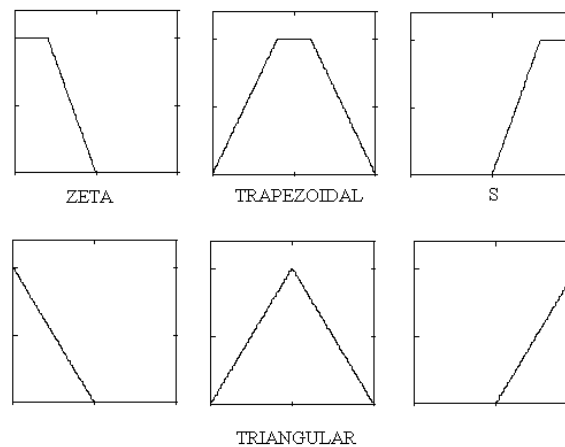


Figura 5.3 Algunas formas de funciones de pertenencia.

Como el sistema se va a implementar en un microcontrolador, se eligieron las funciones de pertenencia, mostradas en la figura 5.3, para representar los conjuntos difusos de entrada. Para los conjuntos difusos de salida, se eligieron funciones de pertenencia llamadas singletons. La ventaja de esto es que se requiere de un mínimo de memoria para representar a los conjuntos de entrada y salida, y porque la ejecución de esta etapa del programa se realiza más rápido.

5.1.2 Evaluación de reglas

La evaluación de reglas es un proceso que consiste en mapear los valores difusos de entrada con valores difusos de salida, utilizando proposiciones condicionales tales como:

SI [antecedente], **ENTONCES** [consecuente]

Estas proposiciones condicionales se utilizan para establecer el conjunto de reglas que debe cumplir el controlador, las cuales representan el modelo lingüístico del sistema. Al enunciado que está después de la palabra **SI**, se le llama antecedente y al que está después de la palabra **ENTONCES**, se le llama consecuente.

Para un controlador de dos entradas y una salida, las reglas son de la forma

IF x_1 es A_1^j **AND** x_2 es A_2^k **THEN** B^r

donde

x_1 representa un valor definido de la entrada 1

x_2 representa un valor definido de la entrada 2

A_1^j es el conjunto difuso j de la entrada 1

A_2^k es el conjunto difuso k de la entrada 2

B^r es el conjunto difuso de salida r

Para evaluar las reglas se utiliza un método de implicación, en éste caso se utilizó el método de implicación mínimo o Mandani.

5.1.3 Desdifusión

La desdifusión es un proceso que consiste en determinar un valor definido z^* , que represente a los conjuntos difusos de salida. Para hacer la desdifusión, existen los siguientes métodos:

- *El método del centroide* consiste en determinar el punto de equilibrio, de la figura formada por los conjuntos difusos de salida, con la expresión $z^* = \frac{\int x\mu(x)dx}{\int \mu(x)dx}$. El punto de equilibrio obtenido se utiliza para representar a los conjuntos difusos de salida.

- El método de centro de gravedad (COG) se utiliza cuando los conjuntos difusos de salida se representan con singletons. El punto representativo de los conjuntos de salida se determina con la expresión $z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$.

- El método de altura máxima consiste en realizar un barrido de todos los elementos de los conjuntos difusos de salida, para localizar el elemento con mayor grado de pertenencia. El elemento obtenido se utiliza para representar los conjuntos difusos de salida.

Por ejemplo, al realizar un barrido de todos los elementos de los conjuntos difusos de la figura 5.4, se determinó que el elemento con mayor grado de pertenencia es z^* .

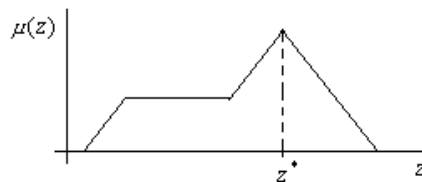


Figura 5.4 Proceso de desfusión con el método de altura máxima.

- El método de primero de los máximos se aplica a conjuntos difusos de salida con forma triangular. Consiste en realizar un barrido, de izquierda a derecha, de los elementos de los conjuntos difusos hasta obtener el primer elemento con valor de pertenencia máximo, el cual se utiliza para representar a los conjuntos difusos de salida.

Por ejemplo, al realizar un barrido, de izquierda a derecha, de los elementos de los conjuntos difusos de salida de la figura 5.5, se determinó que el primer valor de pertenencia máximo se encuentra en el elemento z^* .

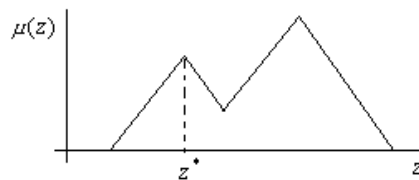


Figura 5.5 Proceso de desfusión con el método de primero de los máximos.

El método de último de los máximos se aplica también cuando los conjuntos difusos de salida tienen forma de figuras triangulares. Consiste en realizar un barrido, de izquierda a derecha, de los elementos de los conjuntos difusos hasta obtener el último valor de pertenencia máximo, el cual se utiliza para representar a los conjuntos difusos de salida. Por ejemplo, al realizar un barrido, de izquierda a derecha, de los elementos de los conjuntos difusos de salida de la figura 5.6, se determinó que el último valor de pertenencia máximo se encuentra en el elemento z^* .

Figura 5.6 Proceso de desfusión con el método de último de los máximos.



- El método de promedio pesado se aplica cuando los conjuntos difusos de salida están formados por figuras simétricas. Para aplicarlo se sigue los siguientes pasos:

1. Se identifican las figuras simétricas.
2. Se obtiene el punto $(z_1, \mu(z_1))$, localizado sobre el eje de simetría de cada figura
3. Se aplica la expresión $z^* = \frac{\sum z_i \mu(z_i)}{\sum \mu(z_i)}$

Por ejemplo, en los conjuntos difusos de salida de la figura 5.7 se tienen dos figuras simétricas, las cuales se representan con los puntos $(z_1, \mu(z_1))$ y $(z_2, \mu(z_2))$ ubicados en los ejes de simetría de cada una. El valor representativo de los conjuntos difusos se calcula como $z^* = \frac{z_1 \mu(z_1) + z_2 \mu(z_2)}{\mu(z_1) + \mu(z_2)}$

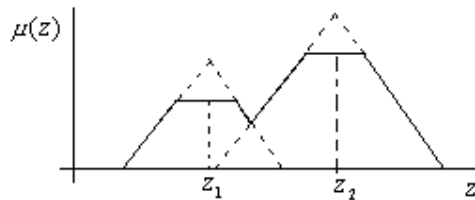


Figura 5.7 Proceso de desdifusión con el método de promedio pesado.

- Para aplicar el método de centro de sumas se sigue los siguientes pasos:
1. Se determina un punto representativo z_i para cada conjunto difuso.
 2. Se calcula el área A_i de cada conjunto difuso.
 3. Se obtiene un punto representativo de todos los conjuntos difusos con la expresión

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Por ejemplo, en la figura 5.8 se tiene que z_1 y z_2 representan los puntos representativos de los conjuntos difusos, donde A_1 y A_2 representan las áreas de cada conjunto, al aplicar el método de centro de sumas se obtiene que $z^* = \frac{z_1 A_1 + z_2 A_2}{A_1 + A_2}$

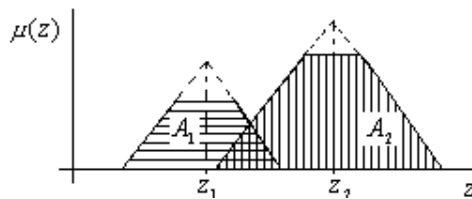


Figura 5.8 Proceso de desdifusión con el método de centro de sumas.

- El método de promedio de máximo consiste en realizar un barrido de todos los elementos de los conjuntos difusos para localizar el primero y el último elemento con mayor grado de pertenencia, representados como z_1 y z_2 respectivamente. El valor representativo z^* de los conjuntos difusos se calcula con la expresión $z^* = \frac{z_1 + z_2}{2}$.

Por ejemplo, para realizar un barrido de todos los elementos del conjunto difuso de la figura 5.9, se encontró el primer valor máximo de pertenencia en el elemento z_1 y el último valor máximo de pertenencia en el elemento z_2 . El valor representativo de los conjuntos se calcula como el valor promedio de estos dos elementos.

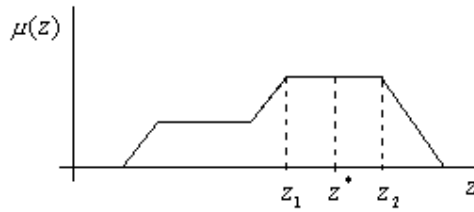


Figura 5.9 Proceso de desdifusión con el método de promedio de máximos.

- Para aplicar el método de centro de área mayor, se siguen los siguientes pasos:
 1. Se identifican los conjuntos convexos que forma la figura.
 2. Se calcula el área de cada conjunto convexo.
 3. Se comparan las áreas.
 4. Se obtiene el centroide del área mayor.

Por ejemplo, en la figura 5.10 se tienen los conjuntos convexos A y B cuyas áreas son A_1 y A_2 respectivamente. Si al comparar las áreas se obtiene que $A_1 > A_2$, entonces el punto representativo de los conjuntos difusos se obtiene con el centroide del conjunto

convexo de área mayor con la expresión: $z^* = \frac{\int z_{A1} \mu_{A1}(z) dz}{\int \mu(z)_{A1} dz}$

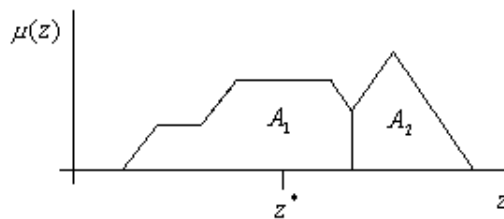


Figura 5.10 Proceso de desdifusión con el método de centro de área mayor.

5.2 Acciones básicas de control

En un controlador difuso se pueden implementar directamente las acciones de control proporcional P y de proporcional derivativo PD. Las acciones de control P+I y PD+I se obtienen de manera indirecta agregando una etapa de integración externa al controlador. La acción de control proporcional modifica la rapidez de respuesta del sistema, ya que la salida del controlador es directamente proporcional a la señal de error. La acción de control integral elimina el error en estado estacionario. La acción de control derivativo tiene un efecto anticipativo, en el sentido de que modifica la señal de control de manera proporcional a la variación de la señal de error, de esta manera la acción de control derivativa se anticipa al error.

5.3 Controlador difuso PD

En la figura 5.11 se muestra un controlador difuso PD, el cual consta de dos entradas (el error y la derivada del error) y n salidas.



Figura 5.11 Controlador difuso PD.

Para el caso particular de este proyecto se diseñó un controlador difuso PD de una salida como el que se muestra en la figura 5.12

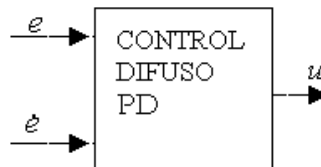


Figura 5.12 Controlador difuso PD de una salida.

La salida del controlador difuso PD de la figura 5.12 es de la forma

$$u = A + P e + D \dot{e} \dots \quad (1)$$

donde

u es la salida del controlador difuso PD

A , P y D son valores constantes

e es la señal de error

$\dot{e}$ es la derivada del error

5.4 Controlador difuso P+I

Al conectar una etapa integradora a la salida del controlador difuso PD de la figura 5.12, se obtiene una acción de control proporcional más integral. En la figura 5.13 se muestra un controlador difuso P+I.

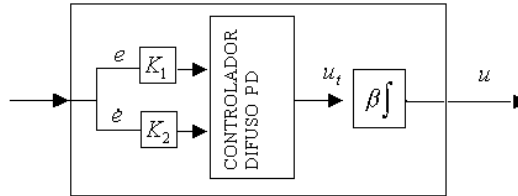


Figura 5.13 Controlador difuso P+I.

Con base en la figura 5.13 se tiene que

$$u = \beta \int u_t dt \quad \dots (2)$$

Sustituyendo (1) en (2)

$$u = \beta \int (A + Pe + D\dot{e}) dt$$

$$u = \beta At + \beta K_2 D e + \beta K_1 P \int e dt \quad \dots (3)$$

donde

K_1 es el factor de escala de la entrada error

K_2 es el factor de escala de la entrada rapidez de cambio del error

La ecuación (3) muestra que es posible obtener una acción de control proporcional más integral, a partir de una acción de control proporcional derivativa difusa.

5.5 Controlador difuso PD+I

La estructura propuesta para realizar un controlador difuso PD+I tiene conectados en paralelo los controladores difusos PD y P+I, como se muestra en la figura 5.14.

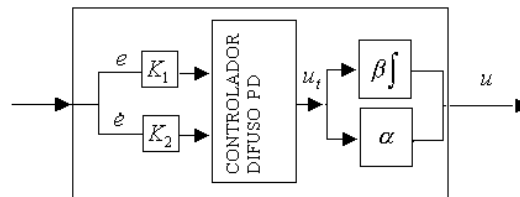


Figura 5.14 Controlador difuso PD+I.

De la figura 5.15 se tiene que

$$u = \alpha u_t + \beta \int u_t dt \quad \dots \quad (4)$$

Sustituyendo (1) en (4)

$$u = (A + Pe + De)\alpha + \beta \int (A + Pe + De)dt$$
$$u = \alpha A + \beta A t + (\alpha P + \beta D)e + \alpha D \dot{e} + \beta P \int e dt \quad \dots \quad (5)$$

A esta nueva estructura se le conoce como controlador difuso PD+I, donde α y β representan los pesos del control derivativo e integral respectivamente.

Si el cociente α/β es grande, implica que la acción de control es más derivativa que integral y si el cociente es pequeño, implica que la acción de control es más integral que derivativa.

Si $\alpha > 0$ y $\beta = 0$ se tiene una respuesta PD.

Si $\alpha = 0$ y $\beta > 0$ se tiene una respuesta P+I.

Si $\alpha > 0$ y $\beta > 0$ se tiene una respuesta PD+I.

CAPITULO VI

COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de nivel de líquido propuesto consta básicamente de un tanque, una bomba de agua, dos válvulas de control y un controlador difuso.

El tanque es un cilindro de acrílico transparente de 55 cm de altura y 7 cm de radio y la bomba de agua, de 25 W, es de una lavadora.

Las válvulas de control son dos llaves de agua de compuerta, iguales y de media pulgada, activadas electrónicamente.

El controlador difuso se implementó en un microcontrolador, el cual se conecta a los siguientes módulos: sensor de nivel de líquido, teclado, etapa de potencia de la bomba de agua, un visualizador LCD y dos válvulas de control.

En la figura 6.1 se muestran los componentes del sistema de controlador difuso.

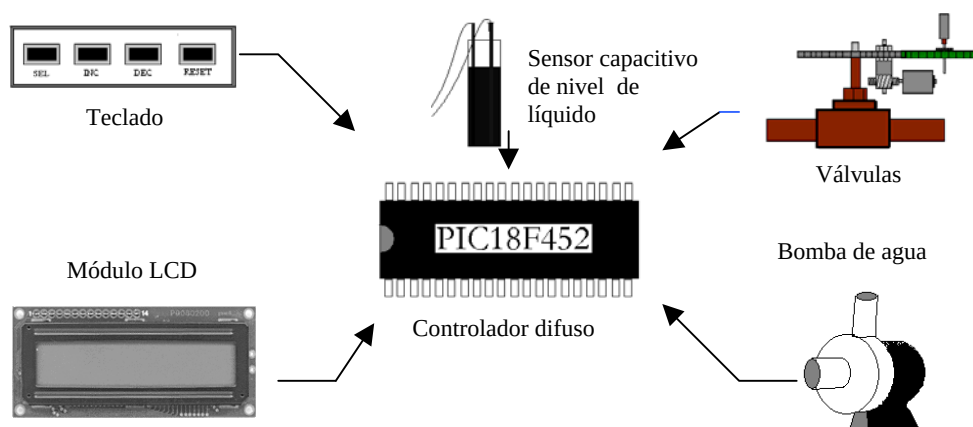


Figura 6.1 Componentes del sistema de control difuso.

El microcontrolador utilizado para implementar el control es un PIC18F452 de Microchip. Para comunicarse con el microcontrolador se utiliza un teclado de cuatro botones, los cuales permiten introducir datos y reiniciar el controlador.

El sensor de nivel de líquido está basado en un potenciómetro (PRESET) multivoltas.

Para poder visualizar el nivel de referencia, el nivel medido y el error se utiliza un módulo LCD.

La etapa de potencia está formada por un interruptor de estado sólido (TRIAC) que enciende o apaga la bomba de agua.

6.1 Características del PIC18F452

Existe una gran variedad de microcontroladores en el mercado, los cuales difieren principalmente en tamaño, tipo de memoria, número de puertos E/S y módulos de control de periféricos. Actualmente la mayoría utiliza la arquitectura Harvard, la cual permite mayor velocidad de operación que la arquitectura tradicional de Von Neumann.

El programa de control desarrollado contiene como máximo 1500 instrucciones y utiliza menos de 30 variables. Requiere de un módulo convertidor analógico a digital (CAD) para adquirir el nivel de líquido, la posición de la llave de llenado y la posición de la llave de vaciado. Se necesitan tres puertos de E/S para conectar el teclado, el display y las salidas de control de las llaves.

Para implementar el control, se utilizó un PIC de la familia 18FXXX de Microchip, porque es un microcontrolador actual disponible y porque cumple con los requisitos necesarios para almacenar el programa.

Características generales:

- Memoria de programa lineal, direccionamiento de 32Kbytes.
- Memoria de datos lineal, direccionamiento de 1.5Kbytes.
- 32K de memoria Flash de programa (memoria ROM).
- 1536 bytes de memoria RAM, 256 bytes de memoria de datos EEPROM.
- Número de instrucciones 16384, prioridad de niveles de interrupción.
- Multiplicador de 8x8 bits.

Características externas:

- Puede suministrar o conectar a tierra 25mA.
- Tres pines de interrupción externa y cuatro temporizadores.
- Opción de reloj oscilador secundario, 2 módulos de captura/comparación, PWM.
- Puerto Serial Síncrono Maestro(MSSP).
- Módulo USART direccionable y puerto paralelo Esclavo, módulo(PSP).

Características analógicas:

- Un módulo CAD de 10 bit con 8 canales, detección de bajo voltaje programable(PLVD).

Tecnología CMOS:

- Voltaje de operación de 2V a 5.5V y bajo consumo de potencia.

Otras características:

- Cuatro puertos E/S llamados A, B, C y D, frecuencia máxima es de 40MHz.
- Conjunto de 75 instrucciones.

Se utilizó un cristal de 20MHz, con el cual se obtiene una frecuencia de trabajo de 5MHz (200ns por instrucción) y un tiempo de ejecución del programa de 5ms. Se ajustó el programa para que adquiriera 2 muestras de nivel de líquido por segundo.

6.2 Sensor de nivel de líquido

El sensor de nivel de líquido es capacitivo. Está integrado por un circuito monoestable, un circuito astable y dos alambres de cobre. En la figura 6.2 se muestra el diagrama de bloques del sensor. Para construirlo, primero se midió la capacitancia mínima con el tanque vacío y después se midió la capacitancia máxima con el tanque lleno. Con estos datos se calcula la frecuencia de oscilación del circuito astable.

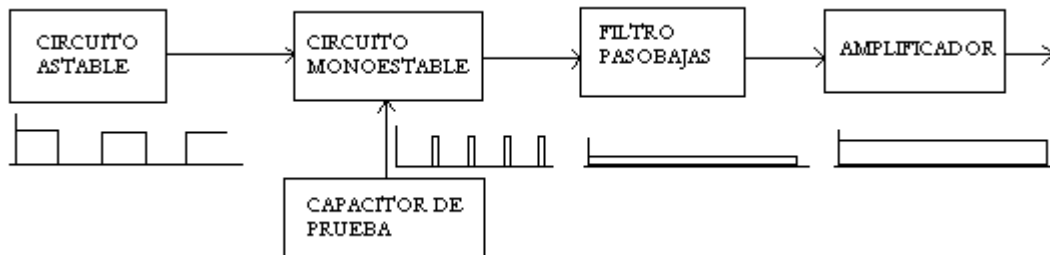


Figura 6.2 Diagrama de bloques del sensor de nivel de líquido.

El capacitor de prueba, formado por el tanque de agua y los alambres de cobre, se conecta a la segunda etapa del sensor de nivel, la cual está formada por un circuito monoestable. De esta manera, el capacitor de prueba se carga a $1/3$ de la tensión de alimentación cuando la señal de operación generada en la primera etapa del sensor está en estado alto y se descarga cuando está en estado bajo o cero.

La señal generada en la segunda etapa del sensor, es una onda cuadrada periódica con ancho de pulso proporcional a la capacitancia del tanque. Esta señal es filtrada mediante un filtro pasobajas para obtener la componente de DC. Posteriormente se hace pasar la señal filtrada por un amplificador, el cual cumple la función de acondicionador de señal.

6.3 Teclado

Para introducir el nivel de referencia, ajustar la posición de las llaves y reiniciar el microcontrolador se utiliza un teclado de cuatro botones, como el que se muestra en la figura 6.3.



Figura 6.3 Teclado.

La tecla (INC) y (DEC) se utilizan para el incremento y decremento del valor de referencia respectivamente. La tecla (SELEC) sirve para aceptar una opción, para aceptar un dato o para introducir un nuevo nivel de referencia. La tecla (CLR) se utiliza para reiniciar el control.

6.4 El módulo LCD

Para poder ver las opciones y los datos se utiliza un módulo LCD, en vez de usar varios visualizadores de 7 segmentos. Los visualizadores requieren para su utilización de varios componentes externos, como registros de corrimiento y decodificadores, aumentando el consumo de energía, el número de conexiones externas y el tiempo para realizarlas.

Los módulos LCD están compuestos básicamente por una pantalla de cristal líquido y un microcontrolador especializado. Este microcontrolador contiene los circuitos de control y memorias para desplegar el conjunto de caracteres ASCII, un conjunto de caracteres japoneses, griegos y algunos símbolos matemáticos, por medio de un circuito llama generador de caracteres. La pantalla de cristal líquido está conformada por una o dos líneas de 8, 16, 20, 24 ó 40 caracteres de 5 por 7 pixeles cada uno. Los módulos tienen una interfase paralela para ser manejada por un microcontrolador o por una PC.

El display que se utiliza es un módulo Dot Matrix LCD, fabricado por Tianma Microelectronics. Es un módulo de visualización de dos líneas de 16 caracteres cada una.

Aunque la disposición de las terminales en el LCD aún no está normalizada, los tipos de señal manejados por ellos son casi estándar, por lo que no hay gran diferencia entre cada uno de ellos. Puede variar uno que otro comando, pero no el cableado del módulo en lo que a señales se refiere.

En la siguiente tabla se muestra la función de las patitas del módulo.

Pin	Símbolo	E/S	Función
1	Vss	-	0V
2	Vdd	-	+5V $\pm$ 0.25V (Tensión positiva de alimentación)
3	Vo	-	Tensión negativa para el contraste de la pantalla
4	RS	E	Selector de Dato/Instrucción
5	R/W	E	Selector de Lectura/Escritura
6	E	E	Habilitación del módulo
7	DB0	E/S	BUS DE DATOS
8	DB1	E/S	
9	DB2	E/S	
10	DB3	E/S	
11	DB4	E/S	
12	DB5	E/S	
13	DB6	E/S	
14	DB7	E/S	

Cada vez que se conecta el módulo a la alimentación, este debe configurarse y para esto se envían cuatro instrucciones: operación de 8 ó 4 líneas, activar el display, borrar la pantalla y desplazamiento del cursor a la izquierda o a la derecha.

Para configurar el módulo LCD, se usó la siguiente secuencia de instrucciones:

38 interfase de 8 bits.

0C enciende al lcd y oculta el cursor.

01 limpia el display y manda el cursor al inicio.

06 mover el cursor de izquierda a derecha sin desplazar el mensaje.

En la figura 6.4 se muestra el módulo LCD conectado al microcontrolador. El puerto C se utiliza como bus de datos y tres patitas de E/S del puerto D se utilizan como bus de comandos.

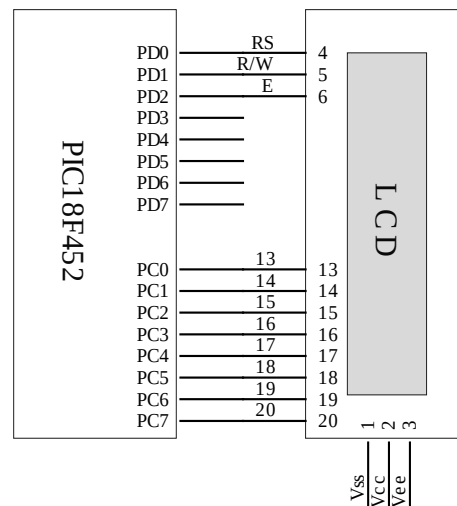


Figura 6.4 Conexión del módulo LCD al microcontrolador.

Para configurar el display se utilizó el diagrama de flujo de la figura 6.5.

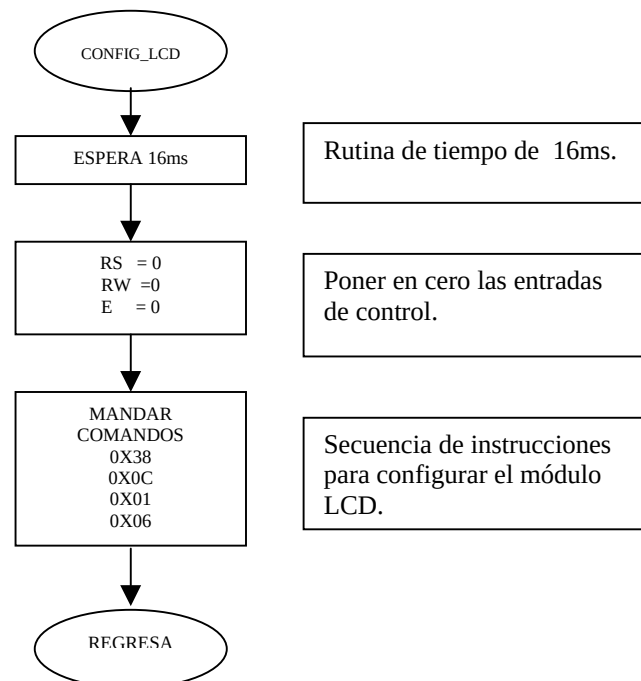


Figura 6.5 Diagrama de flujo para configurar el módulo LCD.

6.5 Válvulas de control

Para las válvulas de control se utilizaron dos llaves de compuerta de ½ pulgada, se consiguieron dos mecanismos reductores de velocidad iguales accionados, cada uno, por un motor de CD de imán permanente. Para acoplar los mecanismos con las llaves, se construyeron dos bases de soporte. El par de los motores se transmite a las llaves por medio de engranes. Para controlar la dirección de giro de los motores se diseñaron dos circuitos puente H. La posición de las llaves se obtuvo mediante dos sensores potenciométricos, los cuales se acoplaron a estas. En la Figura 6.6 se muestra una de las llaves de control construidas.

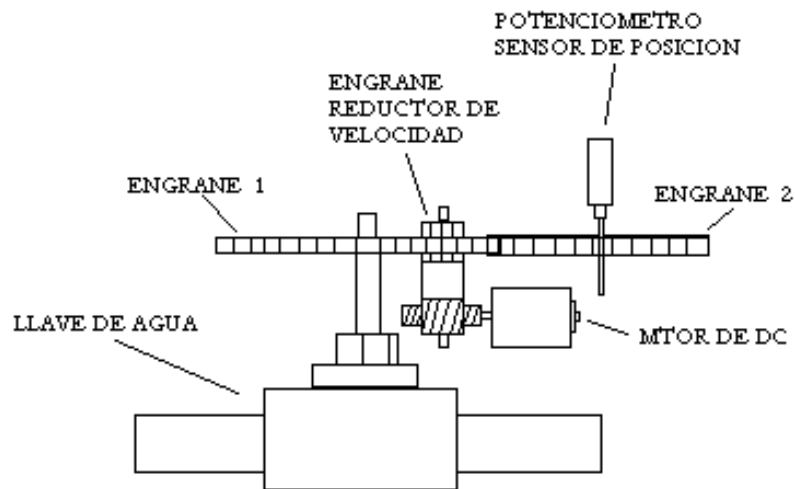


Figura 6.6 Llave de control

Cada llave de control tiene tres entradas y una salida. Las entradas son: la alimentación del motor de DC, la alimentación del sensor potenciométricos y la señal de control para el sentido de giro. La salida es la posición de la llave.

Para controlar las llaves, se diseñó un programa que requiere como entrada el valor deseado de abertura y el valor de posición, medido con un convertidor analógico digital. El programa de control de posición recibe el valor de abertura deseado, el cual es un número entero entre 0 y 8. Cero corresponde a la llave cerrada y ocho corresponde a la llave completamente abierta. Este valor es comparado con el valor de abertura, obtenido mediante un convertidor analógico digital. Si el valor deseado es mayor que el valor medido, entonces el programa manda abrir la llave. Si el valor deseado es menor que el valor de posición medido, entonces el programa manda cerrar la llave. Si los valores son iguales, entonces se apagan los motores y las llaves quedan en el valor de abertura deseado. Estas rutinas se encargan de abrir o cerrar las llaves. *UA* representa el valor deseado para la llave de llenado y *UB* representa el valor deseado para la llave de descarga. En otras palabras, *UA* y *UB* representan la posición de las llaves que pide el controlador.

La llave de carga se controla con la rutina Válv_A y la llave de descarga se controla con la rutina Válv_B. En los siguientes diagramas de flujo se muestran estas rutinas de control.

Diagrama de flujo para el control de la llave de carga.

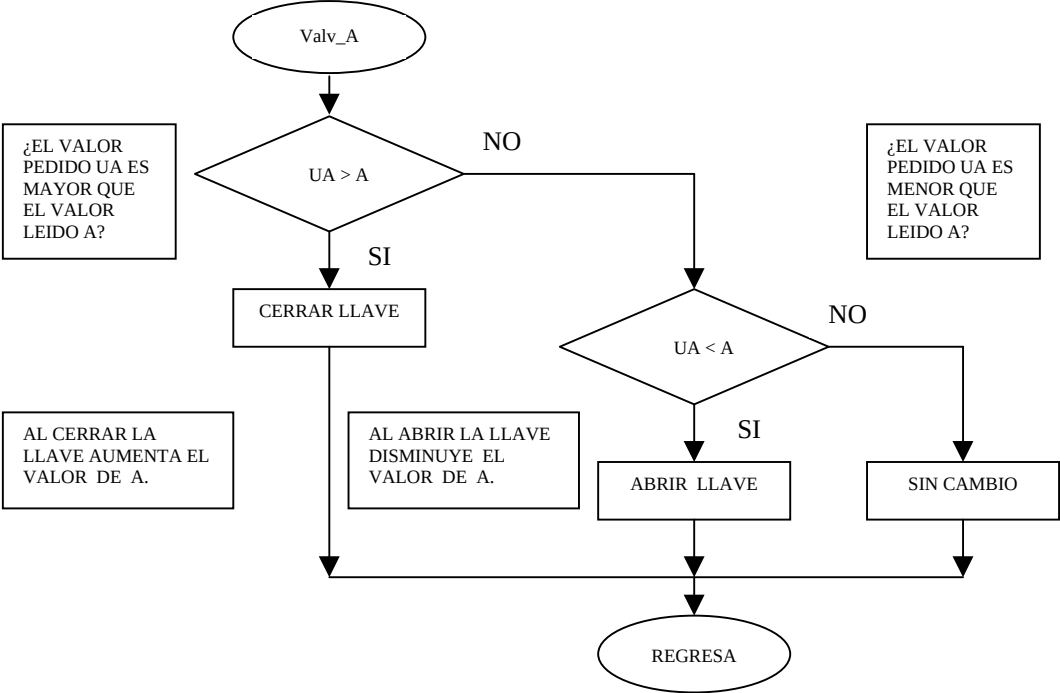
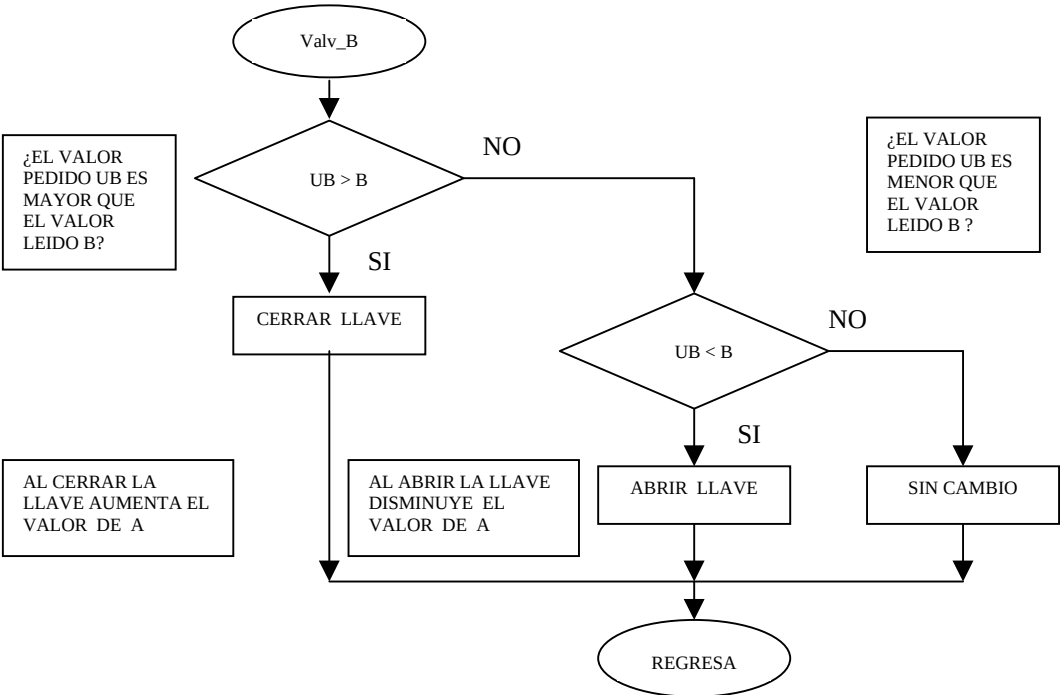


Diagrama de flujo para el control de la llave de descarga.



donde

A= Valor adquirido por el CAD de la posición de la llave Vaciar.

B= Valor adquirido por el CAD de la posición de la llave Llenar.

6.5 Etapa de potencia para activar la bomba de agua

Para activar la bomba de agua, se construyó un control de encendido/apagado basado en un TRIAC. Para manejar el TRIAC se utilizó un optotriac, el cual permite acoplar la etapa de control con la etapa de potencia. De esta manera se puede conmutar el TRIAC con una señal de 5V de CD.

En el apéndice A se muestra el diagrama del circuito de encendido/apagado.

CAPITULO VII

DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO PD+I

Para construir el controlador difuso tipo PD+I, se diseñó primero un controlador difuso PD, el cual consta de dos variables de entrada y una de salida. En el diseño se utilizaron funciones de pertenencia triangulares, trapezoidales y singletons. Se definieron 5 conjuntos difusos para la entrada error, 3 conjuntos difusos para la entrada rapidez de cambio del error y 5 conjuntos difusos para la salida del control. También se definieron 15 reglas para relacionar a los conjuntos de entrada con los de salida. Para realizar la evaluación de reglas se utilizó el método de implicación max-min. La desdifusión se realizó con el método de centro de gravedad, llamado COG. Como se mencionó anteriormente, para obtener la acción de control PD+I, la salida del controlador difuso PD diseñado se conectó en paralelo con una etapa de integración, la cual se implementó en un programa. En este capítulo se muestra también una manera de codificar el algoritmo de control difuso en un microcontrolador PIC mediante el uso de tablas de datos.

7.1 Desarrollo

En la figura 7.1 se muestra el diagrama del controlador difuso PD diseñado. Consta de dos entradas y una salida, las cuales son el error e , la rapidez de cambio del error $\dot{e}$ y la acción de control u_t respectivamente.

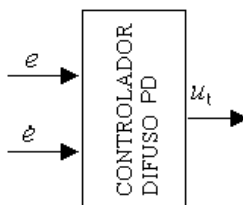


Figura 7.1 Controlador difuso PD de dos entradas y una salidas.

El error e se define y se calcula como

$$e = Nvl_{REF} - Nvl_{MED} \quad \dots (5)$$

donde

Nvl_{REF} es el nivel de referencia

Nvl_{MED} es el nivel medido

La rapidez de cambio del error se define y se calcula como

$$\dot{e} = \frac{e_{ACT} - e_{ANT}}{ut} \quad \dots (6)$$

donde

e_{ACT} es el error actual

e_{ANT} es el error anterior

ut indica unidad de tiempo

Después de definir el número de variables de entrada y salida, se determinaron los rangos de variación o de operación de cada una.

Para determinar el rango de operación de las variables de entrada, se analizaron dos casos:

1. El tanque está inicialmente vacío y se requiere llenarlo al máximo.
2. El tanque está inicialmente lleno y se requiere vaciarlo.

Para el primer caso, las condiciones iniciales son:

$$Nvl_{MED} = 0[cm] \quad y \quad Nvl_{REF} = 40[cm]$$

Sustituyendo las condiciones iniciales en la ecuación (5) se obtiene el valor máximo de la variable error.

$$e = Nvl_{REF} - Nvl_{MED} = 40[cm]$$

Debido a que inicialmente el tanque esta vacío, el error actual y el error anterior serán:

$$e_{ACT} = 40[cm] \quad y \quad e_{ANT} = 0[cm]$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (6) se obtiene el valor máximo de la variable rapidez del error.

$$\dot{e}_{max} = (e_{ACT})_{max} - (e_{ANT})_{min} = 40 \left[\frac{cm}{ut} \right]$$

Para el segundo caso, las condiciones iniciales son:

$$Nvl_{MED} = 40[cm] \quad y \quad Nvl_{REF} = 0[cm] \quad y \quad e_{ANT} = 0 \left[\frac{cm}{ut} \right]$$

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones (5) y (6) se obtiene

$$e = Nvl_{REF} - Nvl_{MED} = -40[cm]$$

$$\dot{e} = e_{ACT} - e_{ANT} = -40 \left[\frac{cm}{ut} \right]$$

Los resultados del análisis anterior son:

El rango de variación del error e es de -40 a $40[cm]$.

El rango de variación de la rapidez del error e' es de -40 a $40\left[\frac{cm}{ut}\right]$.

Las llaves de control son iguales. Para que funcionen requieren un valor de posición entre 0 y 8. Cuando una llave tiene el valor de posición 0, esta se encuentra completamente cerrada y cuando tiene el valor de posición 8, esta se encuentra completamente abierta.

Estas dos llaves, para descarga y llenado del tanque, son controladas por la salida del controlador, la cual tiene un rango de operación de -8 a 8 . El conjunto de números $[-8,0]$ corresponde a la llave de descarga. El conjunto de números $[0,8]$ corresponde a la llave de llenado.

Después de haber sido definidos los rangos de operación de las entradas y de la salida, se divide al universo de discurso de cada variable con funciones de membresía. La figura 7.2 muestra un diagrama de bloques del controlador difuso, en donde las variables de entrada y salida son divididas en conjuntos difusos.

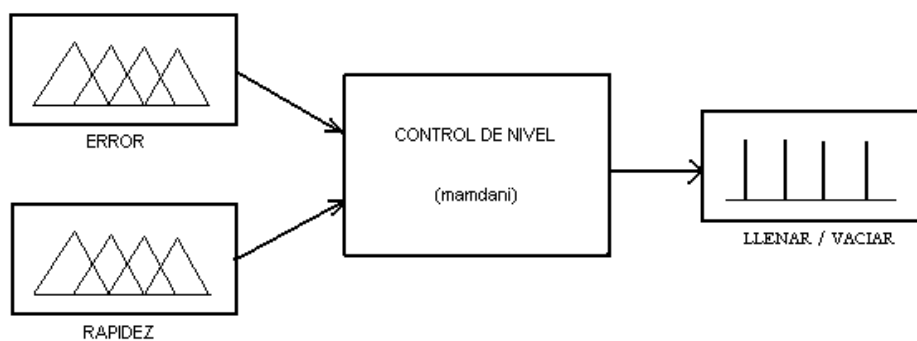


Figura 7.2 Diagrama de bloques del controlador difuso PD de una salida.

No existe una regla que diga cuantos conjuntos difusos se deben poner por cada variable ni la forma que deben tener. En la práctica, el número de conjuntos difusos y la forma de estos, quedan definidos cuando se obtiene la respuesta deseada del sistema de control. Se utilizaron cinco conjuntos difusos para la entrada ERROR y cinco conjuntos difusos para la entrada RAPIDEZ. En la figura 7.3 se muestran las entradas con sus respectivos conjuntos y etiquetas.

Se eligió la forma triangular y trapezoidal para los conjuntos de entrada ya que requieren poca memoria para ser programados en un microcontrolador.

Para el universo de discurso de salida, se utilizaron cinco funciones de membresía, llamadas singletons. Esta forma de función de membresía, al igual que las anteriores, también utiliza poca memoria para su codificación y además permite que el algoritmo de control difuso se ejecute más rápido.

En la figura 7.4 se muestran la salida del controlador con sus conjuntos difusos y etiquetas.

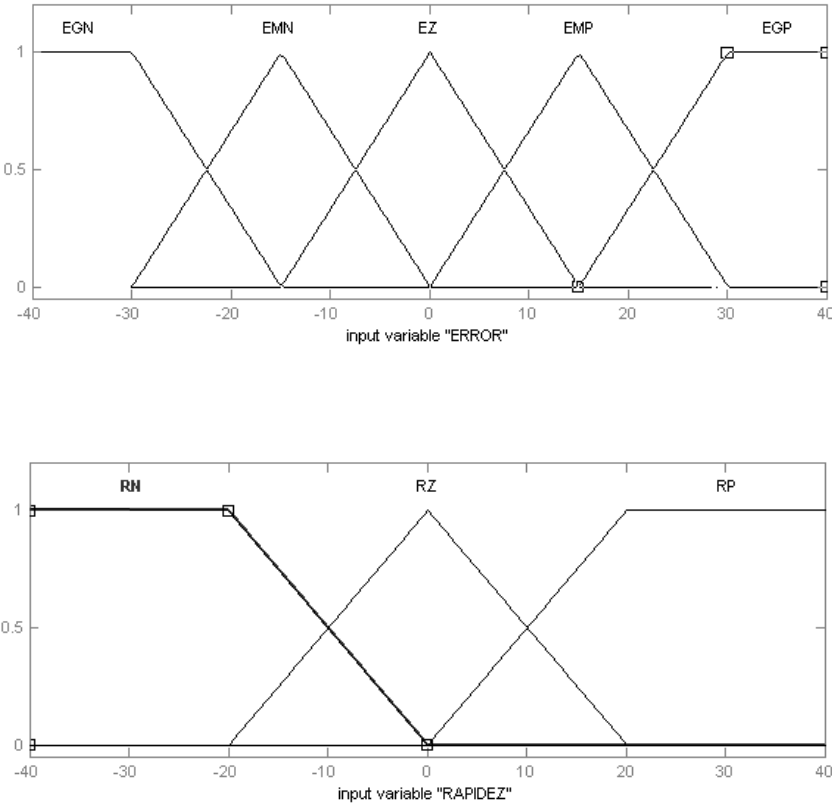


FIGURA 7.3 Conjuntos difusos de la entrada ERROR y RAPIDEZ de cambio del error.

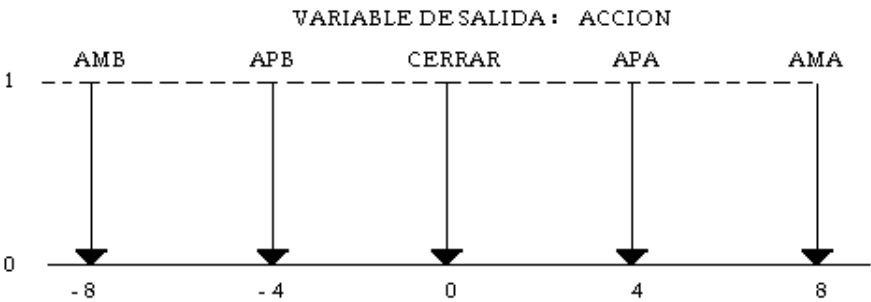


Figura 7.4. Conjuntos difusos de salida

Donde

EGN	Error Grande Negativo	AMB	Abre Mucho la llave B
EMN	Error Mediano Negativo	APA	Abre Poco la llave B
EZ	Error Cero (Z)	CERRAR	Cerrar ambas llaves
EM	Error Mediano Positivo	APA	Abre Poco la llave A
EGP	Error Grande Positivo	AMA	Abre Mucho la llave A
RN	Rapidez de cambio Negativa		
RZ	Rapidez de cambio Cero (Z)		
RP	Rapidez de cambio Positivo		

Para relacionar los conjuntos difusos de entrada con los conjuntos difusos de salida se definieron 15 reglas.

1. **IF** el Error es EGN AND la rapidez es RN **THEN** ACCION es AMB.
2. **IF** el Error es EGN AND la rapidez es RZ **THEN** ACCION es AMB.
3. **IF** el Error es EGN AND la rapidez es RP **THEN** ACCION es AMB.
4. **IF** el Error es EMN AND la rapidez es RN **THEN** ACCION es APB.
5. **IF** el Error es EMN AND la rapidez es RZ **THEN** ACCION es APB.
6. **IF** el Error es EMN AND la rapidez es RP **THEN** ACCION es APB.
7. **IF** el Error es EZ AND la rapidez es RN **THEN** ACCION es CERRAR.
8. **IF** el Error es EZ AND la rapidez es RZ **THEN** ACCION es CERRAR.
9. **IF** el Error es EZ AND la rapidez es RP **THEN** ACCION es CERRAR.
10. **IF** el Error es EMP AND la rapidez es RN **THEN** ACCION es APA.
11. **IF** el Error es EMP AND la rapidez es RZ **THEN** ACCION es APA.
12. **IF** el Error es EMP AND la rapidez es RP **THEN** ACCION es APA.
13. **IF** el Error es EGP AND la rapidez es RN **THEN** ACCION es AMA.
14. **IF** el Error es EGP AND la rapidez es RZ **THEN** ACCION es AMA.
15. **IF** el Error es EGP AND la rapidez es RP **THEN** ACCION es AMA.

Para evaluar las reglas se utilizó el método de composición max-min. Después del proceso de evaluación de reglas se realiza el proceso de desfusión. Para esto se escogió el método de centro de gravedad llamado COG.

7.2 Codificación del algoritmo de control difuso

En esta sección se explica la manera en que fue codificado el algoritmo de control difuso en un microcontrolador.

Para representar a un conjunto difuso con forma triangular y trapezoidal se requieren, como mínimo, dos puntos y dos pendientes. Estas figuras son de interés porque son las funciones de pertenencia que se utilizaron para los conjuntos difusos de entrada. La posición de los puntos y de sus respectivas pendientes se muestra en la figura 7.5.

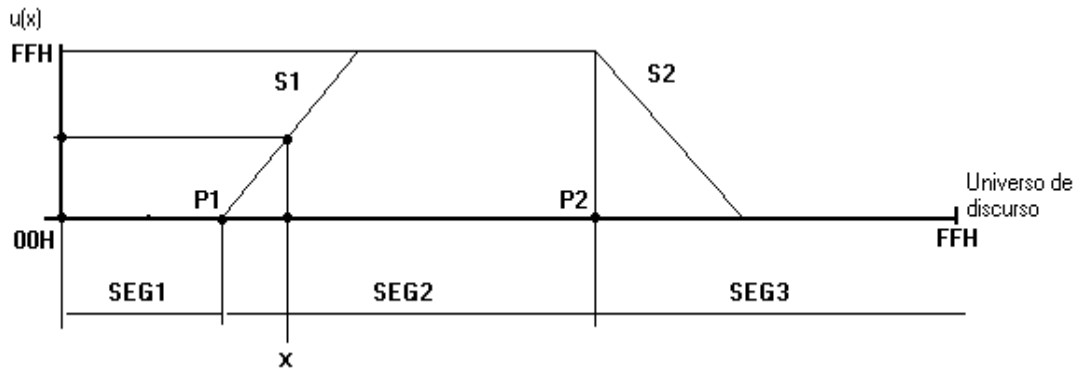


Figura 7.5. Representación con dos puntos y dos pendientes.

Hay entonces cuatro datos por conjunto. Todos los conjuntos de entrada se almacenan en la tabla de puntos y pendientes llamada T_PYP.

De acuerdo a la figura 7.5, el valor de pertenencia a un conjunto difuso de un valor definido x se calcula de la siguiente manera:

SEG1: Si $x < P1 \rightarrow \mu = 0$

SEG2: Si $P1 < x < P2 \rightarrow \mu = (x - P1) * S1$, nunca $> FFH$

SEG3: Si $x \geq P2 \rightarrow \mu = FFH - (x - P2) * S2$

Para asegurar que el valor definido x se encuentre dentro del universo de discurso de una entrada, se hace coincidir el rango de operación de esta con el rango de variación de la palabra utilizada para codificarla. Por ejemplo, si la palabra es de 8 bits entonces se tienen $2^8 = 256$ valores para representar el rango de variación. De esta manera, el universo de discurso de una variable queda codificado desde $00H$ a FFH en la memoria de un microcontrolador de 8 bits. Entonces, las funciones de pertenencia se representan dentro del intervalo $[00H, FFH]$.

En las siguientes secciones se muestran los algoritmos de difusión, evaluación de reglas y desdifusión, así como la codificación de los datos en la memoria ROM del microcontrolador usando diferentes tablas.

7.2.1 Rutina de difusión

En esta etapa se utilizan tres apuntadores para ubicar los elementos de las tablas. APX se asigna a la tabla de entradas y conjuntos difusos de entrada, llamada T_EYCJS, la cual contiene las direcciones de las entradas y el número de conjuntos de cada una. Como se muestra en la figura 7.6, la tabla T_EYCJS tiene cuatro datos: la dirección de la entrada ERROR, el número de conjuntos de entrada, la dirección de entrada RAPIDEZ y el número de conjuntos de esta.

APX →	T_EYCJS	
	28H	E1 (ERROR)
	05H	CJS de E1
	29H	E2 (RAPIDEZ)
	05H	CJS de E2

Figura 7.6 Tabla de entradas y conjuntos difusos por entrada.

El apuntador APY apunta a la tabla de valores difusos por conjunto llamada T_VDXCJ, la cual contiene las direcciones de todos los conjuntos difusos de entrada. El apuntador APZ es asignado a la tabla de puntos y pendientes llamada T_PYP, que contiene todos los puntos y las pendientes de las entradas. En la figura 7.7 se muestra la tabla T_VDXCJ.

APY →	T_VDXCJ	
	60H	EGN
	61H	EMN
	62H	EZ
	63H	EMP
	64H	EGP
	68H	RN
	69H	RZ
	6AH	RP

Figura 7.6 Tabla de conjuntos difusos de entrada.

De la dirección 60H a la dirección 64H están los conjuntos difusos de la entrada ERROR y de la dirección 68H a la dirección 6CH están los conjuntos difusos de la entrada RAPIDEZ. En la tabla T_PYP se almacenan los valores de los puntos y las pendientes de los conjuntos difusos de las entradas. El orden en que se codifican estos datos se muestra en la figura 7.8. y 7.9.

Las tablas T_EYCJS y T_VDXCJ se almacenan en la memoria RAM. La tabla de puntos y pendientes T_PYP se almacena en la memoria ROM. Como se muestra en la figura 7.6, la tabla T_EYCJS tiene cuatro datos: la dirección de la entrada ERROR, el número de conjuntos de difusos de esta entrada, la dirección de la entrada RAPIDEZ y el número de conjuntos difusos de esta. En la tabla T_PYP se tienen 8 conjuntos de los cuales los primeros 5 corresponden a la entrada ERROR y los 3 restantes a la entrada RAPIDEZ. En la figura 7.10 se muestra el diagrama de flujo de la rutina de difusión.

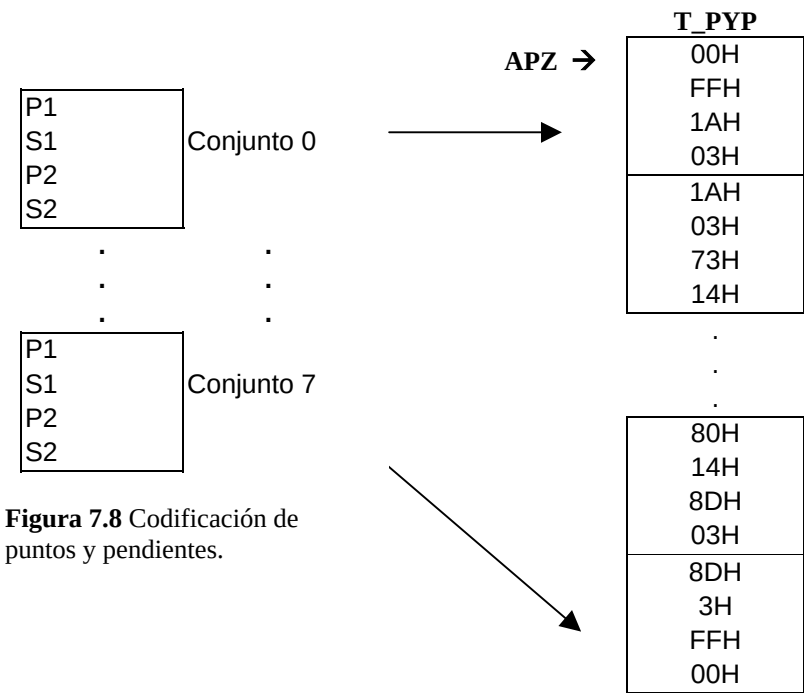


Figura 7.8 Codificación de puntos y pendientes.

Figura 7.9 Tabla de puntos y pendientes T_PYP.

Diagrama de flujo de rutina de difusión:

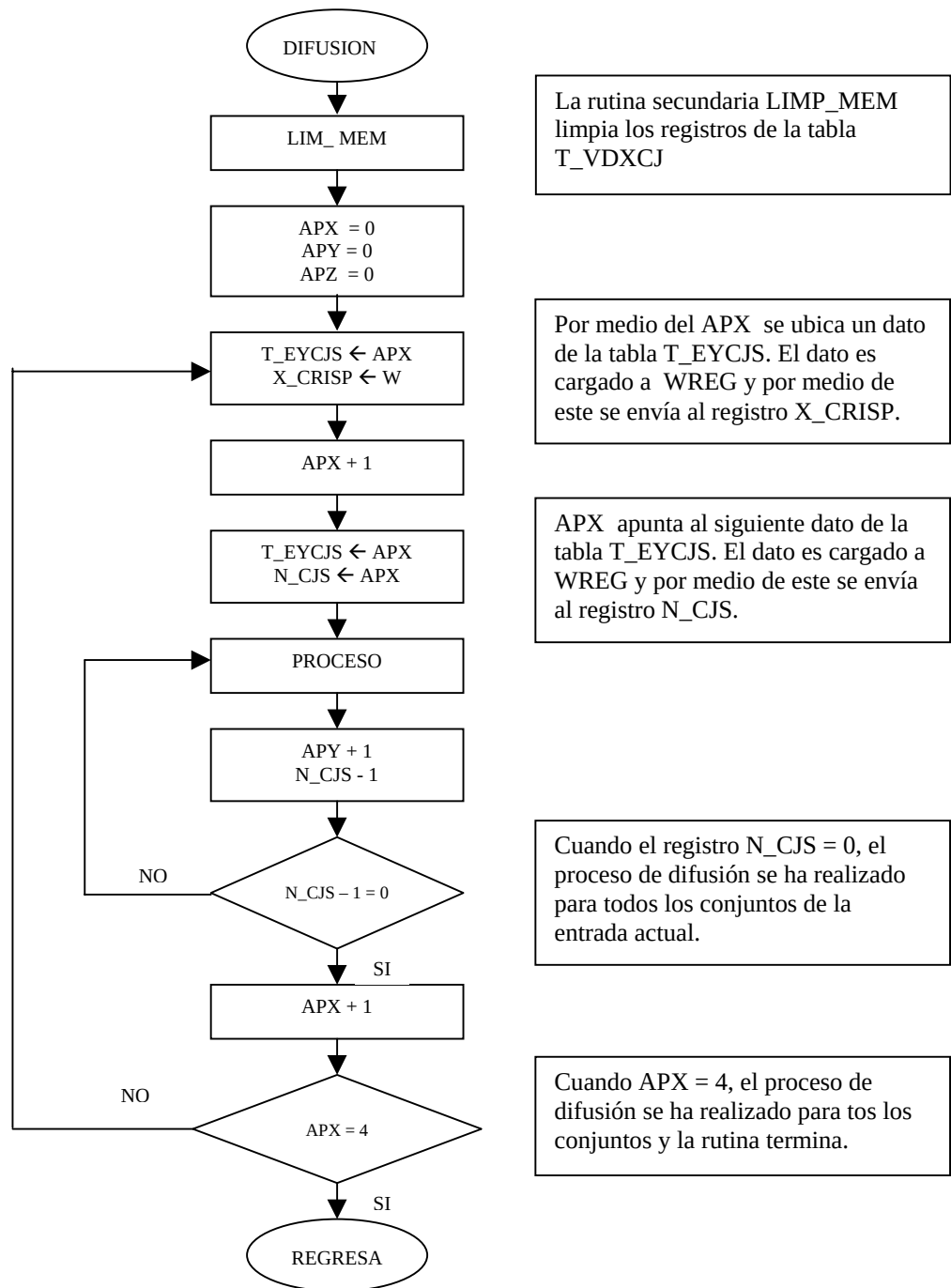


Figura 7.10 Diagrama de flujo de la rutina difusión.

Como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 7.10, la rutina de difusión comienza poniendo en cero todos los registros de la tabla T_VDXCJ. Después pone en cero los apuntadores APX, APY y APZ.

Se coloca el apuntador APX en el primer elemento de la tabla T_EYCJS, el cual contiene la dirección de la entrada ERROR. El programa lee el contenido de la dirección (lee el valor x de entrada) y lo guarda en el registro X_CRISP, después incrementa el apuntador, lee el número de conjuntos de la entrada actual y lo guarda en el registro N_CJS.

Después de obtener el valor de la entrada y el número de conjuntos, el programa llama a la rutina proceso, mostrada en el diagrama de flujo de la figura 7.12a, que es la que realiza el proceso de difusión. Cuando la rutina proceso hizo la difusión para todos los conjuntos de la entrada actual, el programa incrementa el apuntador APX, el cual apunta a la dirección de la siguiente entrada y se repite la secuencia de acciones explicadas anteriormente. Cuando APX = 04 termina la rutina de difusión y el programa pasa a la rutina de evaluación de reglas.

En la rutina proceso se utiliza una tabla auxiliar llamada T_AUX para almacenar los puntos, las pendientes y las diferencias DIF1 y DIF2 del conjunto difuso actual, con el cual se realiza el proceso de difusión.

Inicialmente APZ apunta al primer dato de la tabla T_PYP, el cual es 00H, y el apuntador de direccionamiento directo del microcontrolador FSR0L apunta al primer elemento de la tabla T_AUX mostrada en la figura 7.11. El programa manda el contenido de APZ a la dirección de memoria P1 mediante el apuntador FSR0L, después incrementa los apuntadores APZ y FSR0L.

Cuando APZ=1 y FSR0L=3EH, el segundo dato de la tabla T_PYP es enviado a la dirección 3EH mediante el apuntador FSR0L, es decir, el programa envía el contenido del apuntador APZ a la dirección de memoria apuntada con el apuntador FSR0L. Se incrementa APZ y FSR0L. Este proceso se repite hasta que se han enviado a la memoria RAM los datos del conjunto difuso i-ésimo. Donde i = 0, 1, 2,..., 9.

T_AUX

	Dirección	Nombre
FSR0L →	3DH	P1
	3EH	S1
	3FH	P2
	40H	S2
	41H	DIF1
	42H	DIF2

Figura 7.11 Tabla auxiliar.

Cuando los datos del conjunto i-ésimo están completos, el programa calcula las diferencias DIF1 y DIF2.

Si $DIF1 < 0$ entonces la entrada pertenece al segmento 1 del conjunto.

Si $DIF1 > 0$ entonces se calcula DIF2.

Si $DIF2 < 0$ entonces la entrada pertenece al segmento 2.

Si $DIF2 > 0$ entonces la entrada pertenece al segmento 3.

Como se muestra en la figura 7.12a, en cualquier caso, el valor de pertenencia de la entrada al conjunto i es enviado al registro llamado MU_X y este, a su vez, es almacenado en la dirección indicada en la tabla T_VDXCJ mediante el apuntador APY y FSR0L.

Antes de salir de la rutina proceso, el programa incrementa el apuntador APY.

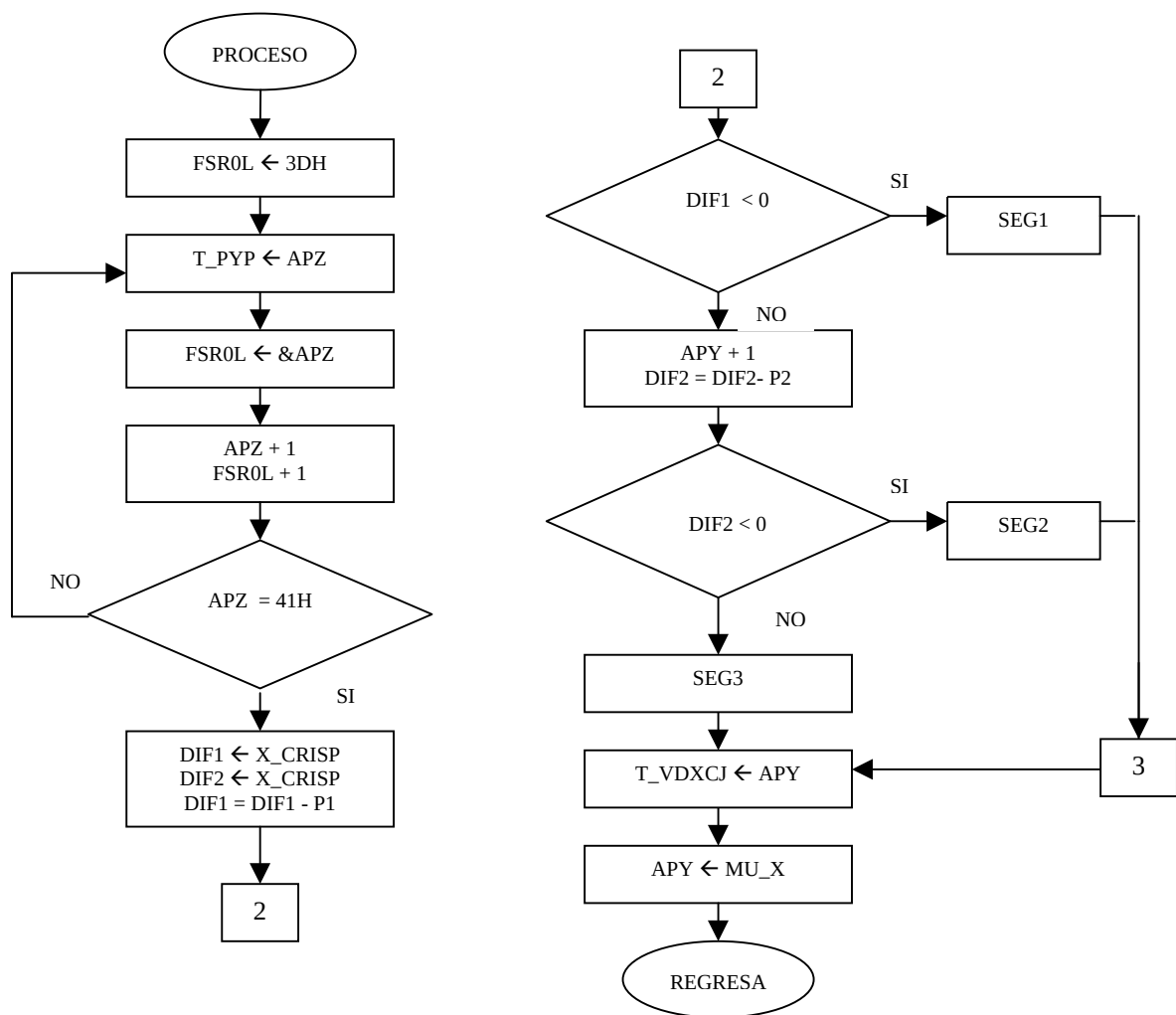


Figura 7.12a Diagrama de flujo de la rutina PROCESO.

Los diagramas de flujo de las subrutina SEG1, SEG2 y SEG3 se muestran en la figura 7.12b.

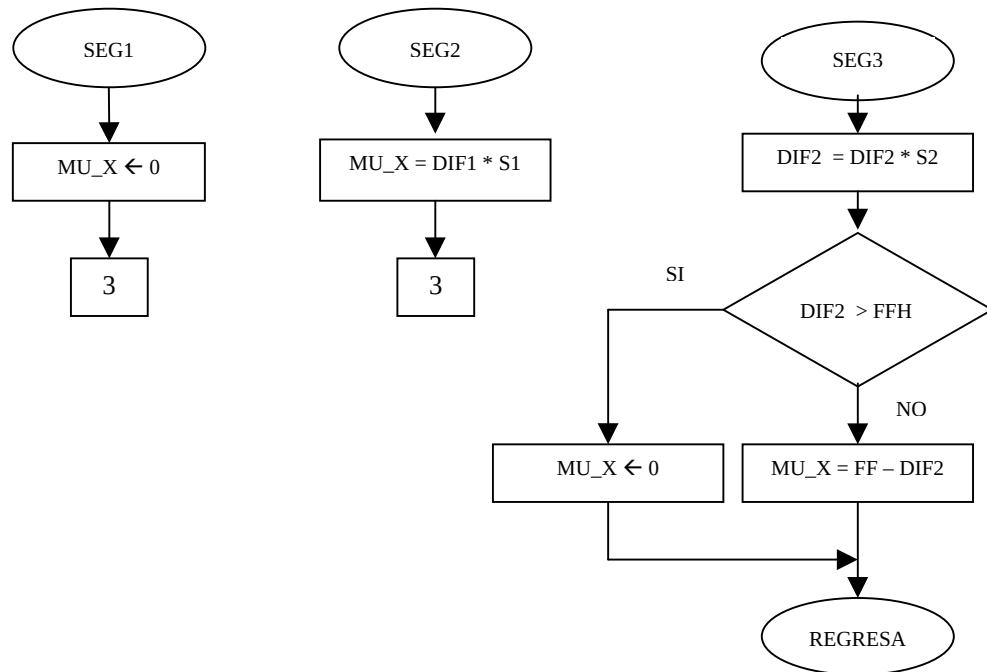


Figura 7.12b Diagrama de flujo de las rutinas secundarias de la rutina PROCESO.

7.2.2 Rutina de evaluación de reglas

Antes de empezar a evaluar las reglas, el programa limpia la tabla de salidas mostrada en la figura 7.13. Para esto son utilizados APX y la subrutina CLR_MEM. Cuando el programa termina de limpiar el bloque de memoria se inicia la evaluación.

APX →	T_SALIDAS	
	80	AMB
	81	APB
	82	CERRAR
	83	APA
	84	AMA

Figura 7.13 Tabla de salidas.

Los apuntadores APX y APY se colocan en la tabla T_VDXCJ y el apuntador APZ se coloca en la tabla T_REGLAS, como se muestra en la figura 7.14.

APX →	T_VDXCJ		APZ →	T_REGLAS
	60H	EGN		80
	61H	EMN		80
	62H	EZ		80
	63H	EMP		81
	64H	EGP		81
				81
	68H	RN		82
APY →	69H	RZ		82
	6AH	RP		82
				83
				83
				83
				84
				84
				84

Figura 7.14 Tabla de valores difusos por conjunto y tabla de reglas respectivamente.

Se pone en cero al apuntador de consecuentes APZ=0. Se ubica APX en el primer conjunto de la entrada E1 y a APY en el primer conjunto de la entrada E2.

El programa manda el contenido de los apuntadores APX y APY a los registros NUM1 y NUM2 respectivamente. Llama a la rutina Max-min, después coloca el dato menor en el registro NUM1 y el mayor en el registro NUM2. Manda el contenido del apuntador APZ al registro NUM2 y nuevamente llama a la rutina Max-min. El dato mayor es enviado a la tabla T_SALIDAS por medio de APZ.

El programa incrementa el registro REG_INT y APZ. Mientras el registro REG_INT sea menor que 1 se repite el proceso de evaluación. En la figura 7.15 se muestra el diagrama de flujo del proceso de evaluación de reglas.

Cuando REG_INT=1, se mantiene APX constante y se incrementa APY para que se ubique en el siguiente conjunto de la entrada E2. Se pone REG_INT en cero y se repite nuevamente el proceso de evaluación hasta que APY = 6D. Cuando se han evaluado todas las reglas que relacionan a un conjunto de la entrada E1 con todos los conjuntos de la entrada E2, se incrementa APX, para que el apuntador se ubique en el siguiente conjunto de la entrada E1. El programa pone nuevamente APY en la dirección 68H (en el primer conjunto de la entrada E2), y se repite el proceso de evaluación hasta que APX=65H. Cuando esto sucede, todas las reglas han sido evaluadas.

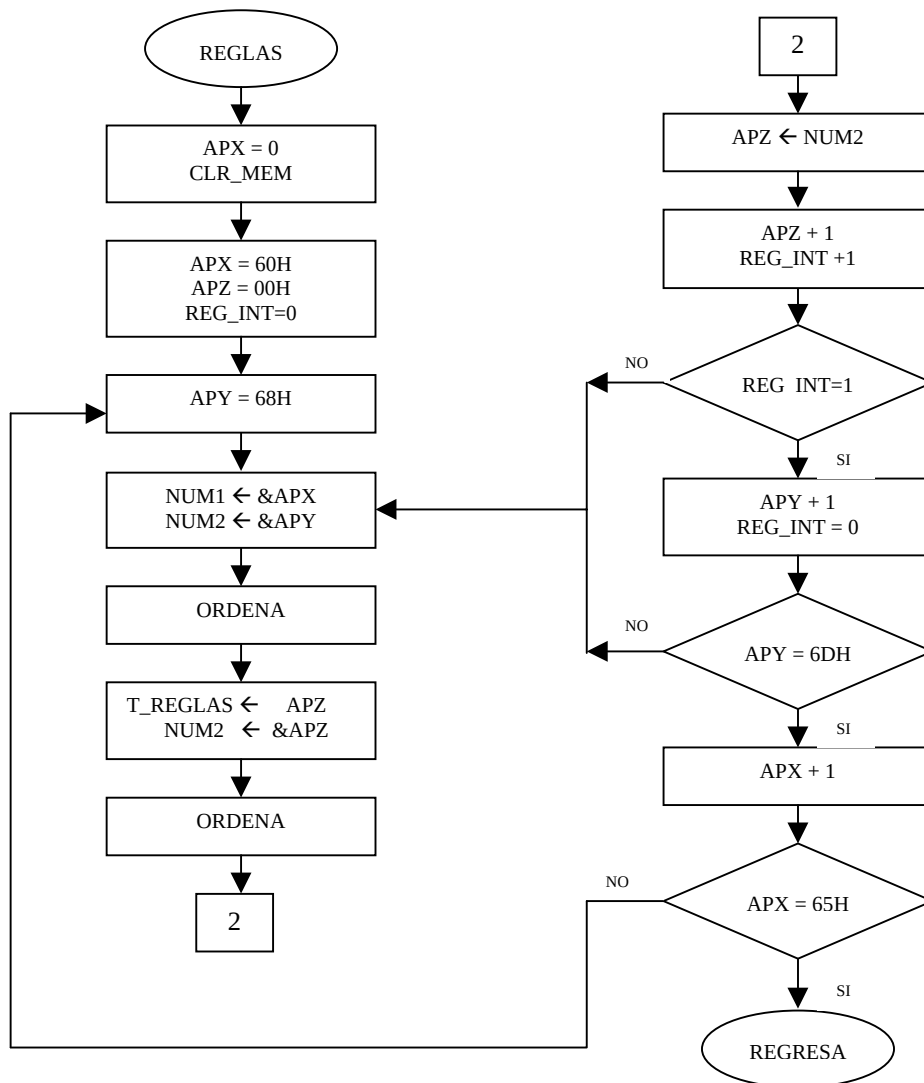


Figura 7.15 Diagrama de flujo para evaluación de reglas.

7.2.3 Rutina de desdifusión

Para realizar el proceso de desdifusión se utilizó el método COG (centro de gravedad), ya que es el método que más se aproxima al resultado exacto definido por el método del centroide y porque el sistema se programó en un microcontrolador.

Como se muestra en la figura 7.16, se utilizaron dos apuntadores para manejar los datos de la tabla posición de las salidas (T_PSLIDAS) y de la tabla de salidas (T_SLIDAS).

APX →	T_PSLIDAS	APY →	T_SALIDAS	
	00H		80	AMVB
	03H		81	AMVB
	08H		82	CERRAR
	0DH		83	APVA
	10H		84	AMVA

Figura 7.16 Tabla de posición de los singletons de las salidas (T_PSLIDAS) y tabla de direcciones de las salidas (T_SALIDAS).

Al inicio de la rutina de desdifusión, mostrada en la figura 7.17, los apuntadores APX y APY se igualan a cero, después el programa llama a la subrutina COG y el valor definido calculado es almacenado en el registro Z1.

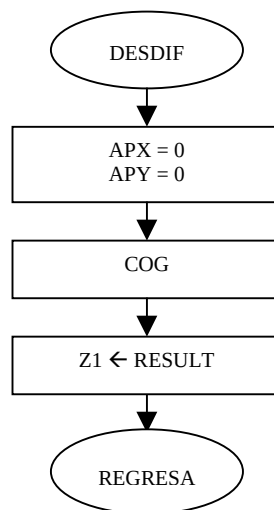


Figura 7.17 Diagrama de flujo de la rutina de desdifusión.

En la subrutina COM se calcula el valor definido para la salida correspondiente, en donde el símbolo & se usa para indicar el contenido de una dirección de memoria. Se inicia poniendo en cero el registro CONT, NUM1 y NUM2. Después se multiplica la posición del

singleton (&APX), con el valor de pertenencia al conjunto(&APY). El resultado se suma con el registro NUM2. El contenido de APY es sumado con el registro NUM1.

Se incrementa APX, APY y CONT. Si $CONT < 03H$, el programa sigue acumulando en el registro NUM2 los productos y en NUM1 la suma de los valores de pertenencia.

Si el registro $CONT = 03H$, entonces se realiza la división de NUM2 con NUM1, el resultado es almacenado en el registro RESULT y termina la rutina secundaria COG. En la figura 7.18 se muestra el diagrama de flujo de la rutina COG.

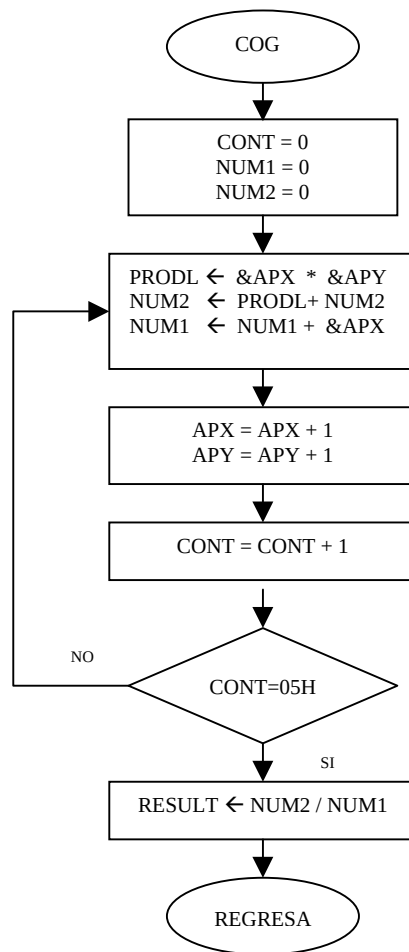


Figura 7.18 Diagrama de flujo de la rutina COG.

MATLAB es un software que permite hacer cálculos matemáticos, analizar datos, desarrollar algoritmos, hacer simulaciones y modelado. También permite desarrollar interfaces gráficas para mostrar resultados. Para simular el controlador difuso diseñado, se utilizó la caja de herramientas de lógica difusa de MATLAB.

Después de construir físicamente el sistema de nivel de líquido y el controlador difuso, se hicieron varias pruebas utilizando diferente número de conjuntos por entrada para el controlador. Al observar el comportamiento del sistema, se determinó que éste puede ser manejado con los conjuntos de entrada y las reglas que se muestran a continuación.

8.1 Simulación del controlador difuso en MATLAB

El controlador difuso PD propuesto para controlar el sistema de nivel de líquido consta de dos entradas y una salida. La entrada ERROR contiene cinco conjuntos difusos y la entrada RAPIDEZ contiene tres conjuntos difusos. En la figura 8.1 se muestran los conjuntos de entrada del controlador

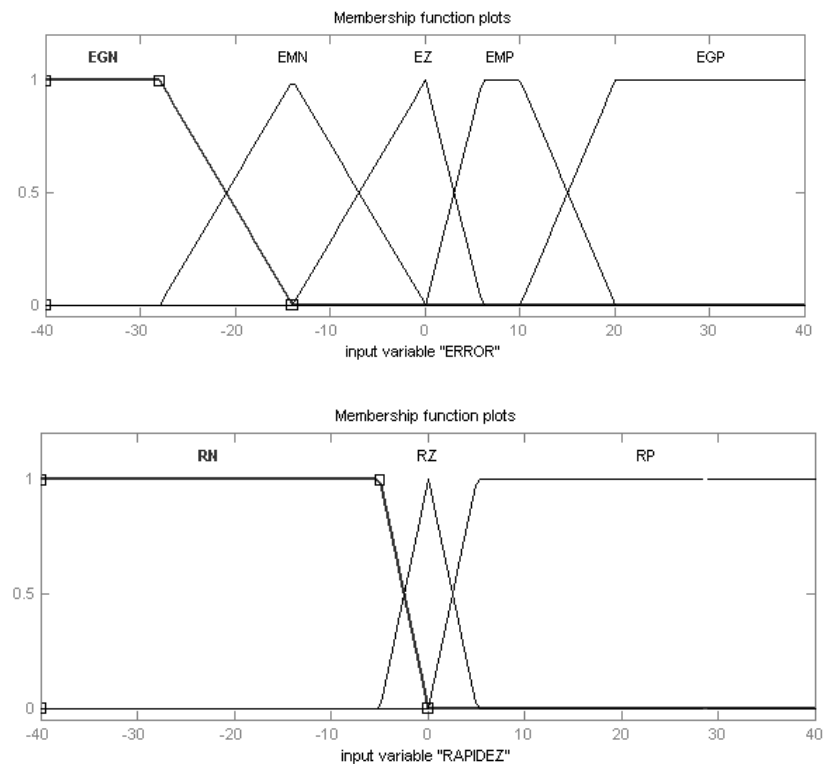


Figura 8.1 Conjuntos de entrada.

La salida ACCION se refiere a la posición de abertura de las dos llaves de control y está formada por 5 singletons, los cuales se muestran en la figura 8.2.

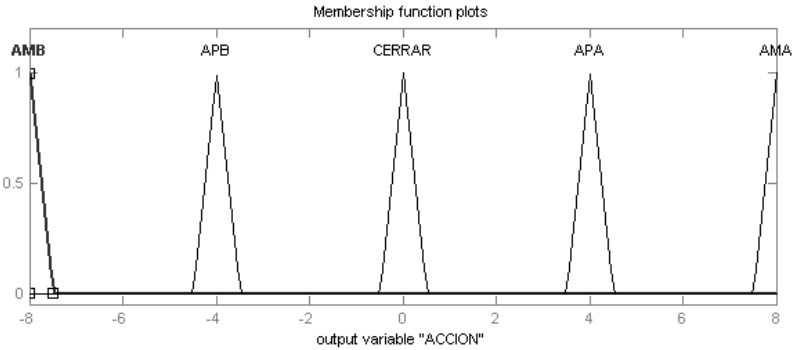


Figura 8.2 Conjuntos de salida.

Se tienen 15 reglas de control que relacionan a los conjuntos de entrada con los conjuntos de salida. Las reglas mostradas dan un comportamiento lineal al controlador. En la figura 8.3 se muestran las reglas utilizadas con sus respectivas etiquetas.

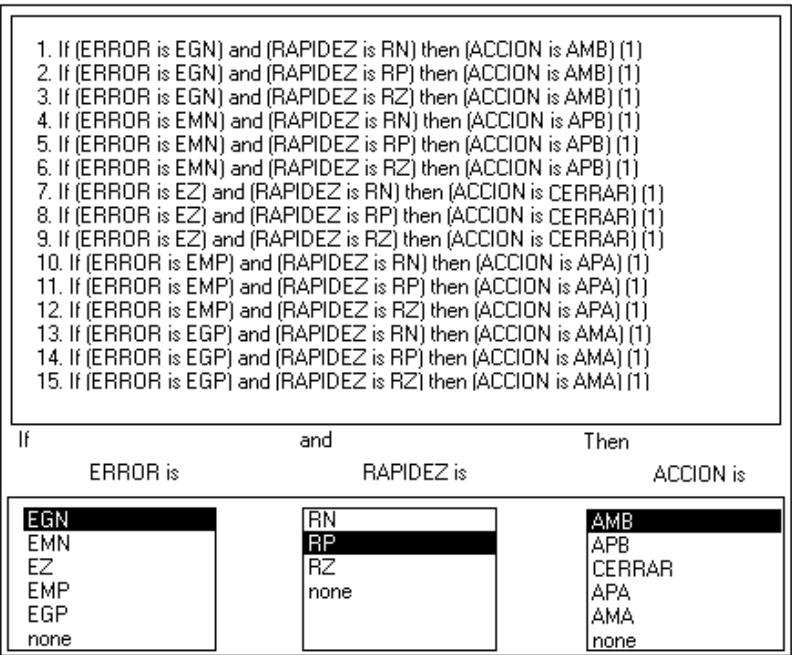


Figura 8.3 Reglas de control.

Con estas reglas y los conjuntos de entrada/salida se obtiene la superficie de control mostrada en la figura 8.4.

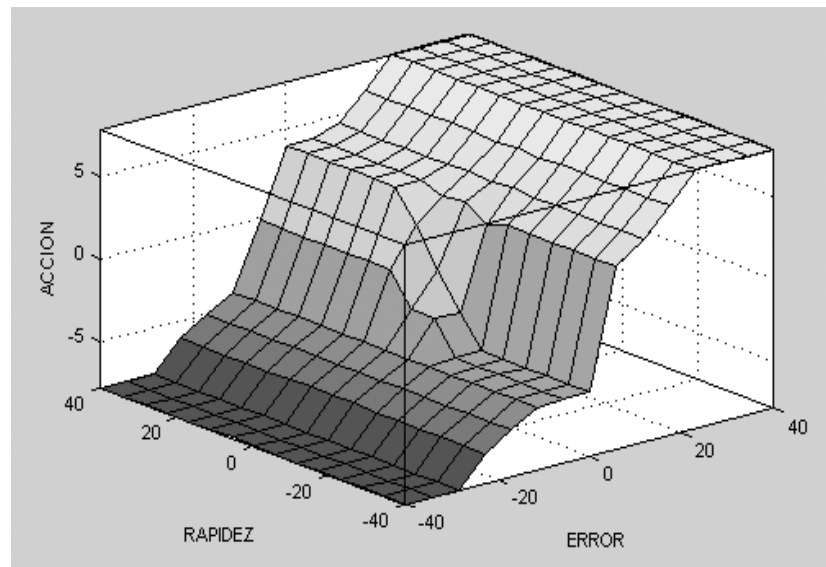


Figura 8.4 Superficie de control del controlador difuso diseñado para el sistema de nivel de líquido.

8.2 Función de transferencia de la planta

Para poder simular la respuesta del sistema de control de nivel de líquido con un controlador analógico, se requiere la función de transferencia del tanque, de las válvulas y del controlador. El modelo matemático, que se desarrolló para representar el sistema de nivel, toma en cuenta las siguientes características:

1. La bomba tarda hasta 1s en suministrar el flujo de llenado.
2. Con la llave de carga totalmente abierta, el tanque vacío tarda en llenarse (a 40 cm de altura) aproximadamente 37s.
3. Con la llave de descarga totalmente abierta, el tanque lleno tarda en vaciarse aproximadamente 17s.
4. Cuando una de las dos válvulas se abre, la otra se cierra.

El tanque es un cilindro de acrílico transparente con las siguientes características:

$$r = 7 \text{ [cm]}$$

$$H = 40 \text{ [cm]}$$

$$A = \pi r^2 = 153.9 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$V = HA = (153.9)(40) = 6156 \text{ [cm}^3\text{]}$$

En la figura 8.5 se muestra el tanque utilizado en el sistema de nivel, donde q_i representa el flujo de entrada y q_o representa el flujo de salida.

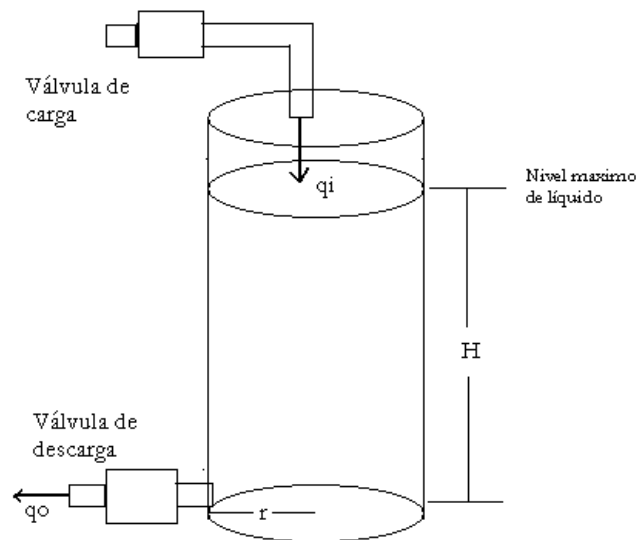


Figura 8.5 Tanque utilizado en el sistema de nivel de líquido.

Al aplicar la ley de conservación de la materia al tanque de la figura 8.7 se obtiene:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} q \quad \dots \quad (1)$$

si $q < 0$ entonces $q = q_0$

si $q = 0$ entonces $q = 0$

si $q > 0$ entonces $q = q_i$

La ecuación (1) establece que cuando $q > 0$, hay flujo de entrada al tanque y el cambio del nivel de líquido con respecto al tiempo es positivo.

Cuando $q = 0$, no hay flujo de entrada ni de salida en el tanque y por lo tanto, el nivel de líquido en el tanque permanece constante.

Cuando $q < 0$, sale agua del tanque y la variación del nivel de líquido en el tanque con respecto al tiempo es negativo.

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación (1), suponiendo condiciones iniciales iguales a cero, se obtiene la función de transferencia del tanque:

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{A} \frac{1}{s}$$

donde A corresponde al área de la base.

En la figura 8.6 se muestra el diagrama de bloque de la función de transferencia del tanque.

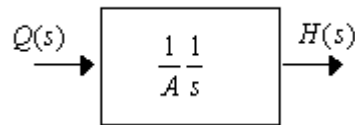


Figura 8.6 Función de transferencia del tanque.

El flujo de entrada q_i , con respecto a la posición θ de la válvula de llenado, se definió como:

$$q_i = K_A \theta \quad \dots \quad (2)$$

y el flujo de salida q_0 , con respecto a la posición θ de la llave de descarga, se definió como:

$$q_0 = K_B \theta \quad \dots \quad (3)$$

donde K_A y K_B son valores constantes.

Al aplicar la transformada de Laplace a las ecuaciones (2) y (3), suponiendo condiciones iniciales iguales a cero, se obtienen las funciones de transferencia del flujo de entrada y de salida con respecto a la posición de las válvulas de carga y descarga respectivamente.

$$\frac{Q_i(s)}{\theta(s)} = K_A \qquad \frac{Q_0(s)}{\theta(s)} = K_B$$

En la figura 8.7 se muestra el diagrama de bloques de la función de transferencia del flujo de entrada y salida, respectivamente.

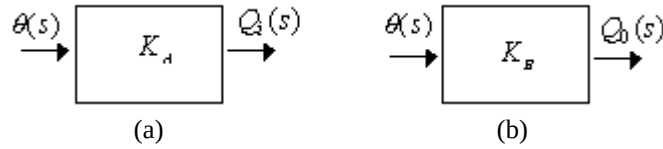


Figura 8.7 Función de tranferencia del flujo de entrada (a), función de tansferencia de flujo de salida (b).

Estos dos bloques son reemplazados por el bloque de la figura 8.8, el cual contiene a las dos funciones de tranferencia del flujo de entrada y de salida. Si la posición de entrada al bloque equivalente es positiva, se utiliza la función de tranferencia del bloque (a). Si la posición de entrada al bloque equivalente es negativa, se utiliza la función de tranferencia del bloque (b). Si la posición de entrada al bloque equivalente es cero, la salida de este es cero, ya que ambas válvulas permanecen cerradas.

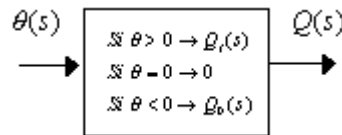


Figura 8.8 Bloque equivalente para el flujo de entrada y de salida con respecto a la posición de las llaves.

La función de tranferencia de las válvulas se obtuvo de la siguiente manera. Como la posición de las válvulas depende de un motor de DC de imán permanente, la función de tranferencia de la posición del rotor θ_m , con respecto a la diferencia de potencial V_a aplicada en sus terminales esta dada por

$$\frac{\theta_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{s(\tau_m s + 1)}$$

donde K_m es la constante de rapidez del motor con carga incluida y τ_m es la constante de tiempo del motor con carga incluida. En la figura 8.9 se muestra el diagrama de bloque de la función de tranferencia de la posición del rotor con respecto a la diferencia de potencial aplicada en sus terminales.

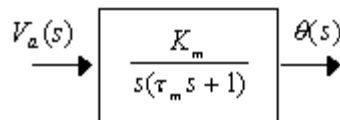


Figura 8.9 Función de transferencia de la posición del rotor de un motor de DC, de imán permanente, con respecto a la diferencia de potencial aplicada.

La función de transferencia del controlador PID analógico se define como

$$\frac{\theta_c(s)}{E(s)} = K_p + K_D s + K_I \frac{1}{s}$$

donde $\theta_c(s)$ es la salida del controlador, que en este caso es la posición de la llave, $E(s)$ es el error entre el nivel de referencia y el nivel medido, K_p es la ganancia proporcional, K_D es la ganancia derivativa y K_I es la ganancia integral.

En la figura 8.10 se muestra el diagrama de bloque del controlador PID analógico.

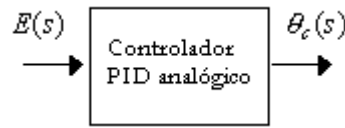


Figura 8.10 Controlador PID analógico.

Para simular la respuesta del sistema de control de nivel de líquido con un controlador difuso en MATLAB, se utilizó el bloque Fuzzy Logic Controller, el cual se cargó con la simulación de la sección 8.1. En la figura 8.11 se muestra el diagrama de bloque del controlador difuso PD utilizado para la simulación, el cual tiene como entradas el error y la derivada del error y como salida el valor de posición de las válvulas de control.

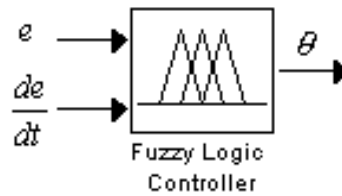


Figura 8.11 Diagrama de bloque del controlador difuso PD simulado en la sección 8.1.

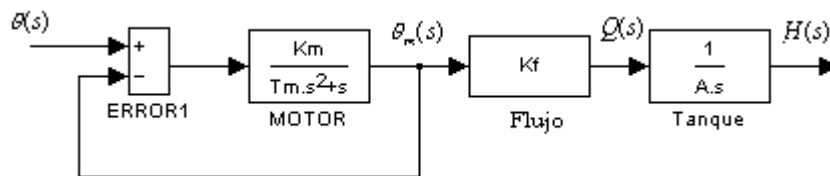


Figura 8.12 Diagrama de bloques de las válvulas y el tanque.

La función de transferencia de las válvulas y el tanque se obtiene de la figura 8.12, de donde:

$$\frac{H(s)}{\theta(s)} = \frac{K_f K_m / A}{s(T_m s^2 + s + K_m)}$$

8.3 Simulación del sistema de control de nivel de líquido en SIMULINK

Para comparar la respuesta del sistema de nivel de líquido con un controlador PD+I difuso con la respuesta del sistema de nivel de líquido obtenida con un controlador PID analógico, se realizó la simulación simultanea del sistema con ambos controles. En la figura 8.12 se muestra el diagrama de bloques que se utilizó para la simulación.

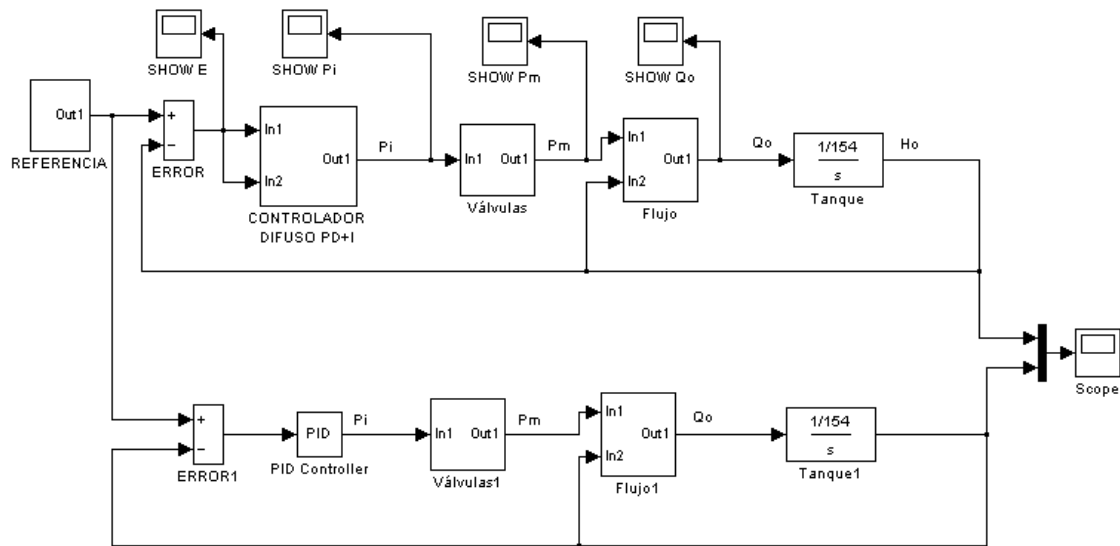


Figura 8.12 Diagrama de bloques en SIMULINK del sistema de control de nivel de líquido con un controlador difuso PD+I y con un controlador analógico PID.

El diagrama de bloques de la parte superior corresponde al sistema de control difuso. Está formado por los subsistemas *control difuso PD+I*, *válvulas*, *flujo* y por el bloque *tanque*.

El subsistema *controlador difuso PD+I* está formado por los bloques mostrados en la figura 8.13. El bloque llamado *MATLAB Function* contiene un programa que convierte un número fraccionario en entero. Por lo tanto, las entradas y la salida del controlador son números enteros.

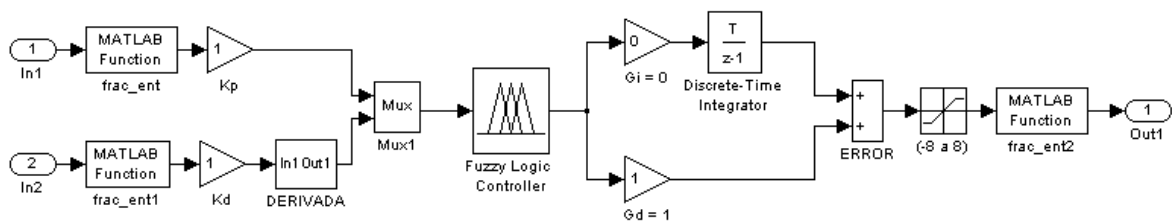


Figura 8.13 Diagrama de bloques del controlador difuso PD+I.

El subsistema *válvulas* está formado por los bloques mostrados en la figura 8.14.

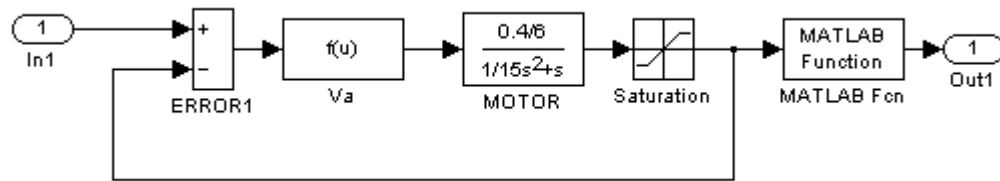


Figura 8.14 Subsistema válvulas.

El bloque *Va* tiene como entrada un numero entero que representa la diferencia entre la posición pedida por el controlador y la posición de la llave. Si la diferencia es positiva, se cierra la válvula de descarga y se activa el motor para abrir la válvula de llenado. Si la diferencia es negativa, se cierra la válvula de llenado, cambia la polaridad de *Va* y el motor se activa para abrir la válvula de descarga. Si el error es cero, ambas válvulas permanecen cerradas.

El subsistema llamado *flujo* está formado por los bloques mostrados en la figura 8.15.

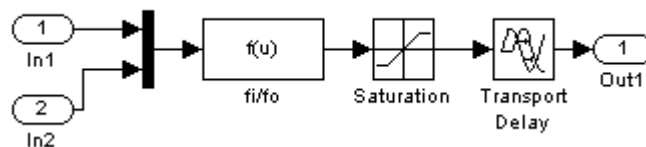


Figura 8.15 Subsistema flujo

El bloque *fi/fo* recibe como entrada la posición de abertura de una llave. Si la posición es positiva el flujo de salida es positivo. Si la posición es negativa el flujo de salida es negativo. Si la posición es cero el flujo de ambas llaves es cero. El bloque *saturación* limita los valores máximos del flujo de entrada y salida. El bloque *retardo* se utilizó para dar a la simulación el efecto de inercia del flujo, ya que el cambio de este requiere de un corto tiempo para alcanzar su estado estable.

El bloque *tanque* tiene como entrada un valor de flujo y como salida nivel de líquido. Si el flujo es positivo, el nivel de líquido aumenta. Si el flujo es negativo, el nivel de líquido disminuye. Si el flujo es cero, el nivel de líquido permanece sin cambio. En la figura 8.16 se muestra el diagrama de bloque del tanque de agua. Se puede observar que el tanque se comporta como una etapa integradora. Por lo tanto, ya no se requiere de otra etapa de integración para eliminar el error en estado estable de la respuesta del sistema.

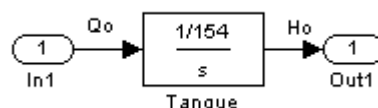


Figura 8.16 Diagrama de bloque del tanque de agua.

8.4 EL controlador difuso contra el controlador analógico

Para poder hacer una comparación teórica de la respuesta del sistema de nivel de líquido, con el controlador difuso PD+I diseñado y un controlador PID analógico, se pidió una respuesta rápida y sin sobrepaso (críticamente amortiguada), para ambos sistemas de control.

El controlador PID analógico que se utilizó en la simulación, se afinó con el *método de límite de estabilidad* de Ziegler-Nichols, el cual consiste en controlar el sistema únicamente con un controlador proporcional. El valor de la ganancia proporcional K_p se incrementa lentamente desde cero hasta un valor de ganancia crítica K_{cr} , para el cual la respuesta escalón de la planta presenta oscilaciones sostenidas de periodo P_{cr} . Los parámetros de K_p , T_i y T_d del controlador PID se determinan con base en la tabla 8.1.

La función de transferencia del controlador PID se puede escribir como

$$G_C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

donde

K_p es la ganancia proporcional

T_d es el tiempo derivativo

T_i es el tiempo de integral

Controlador		K_p	T_i	T_d
Proporcional	P	$0.5 K_{cr}$	Infinito	0
Proporcional integral	PI	$0.45 K_{cr}$	$P_{cr}/1.2$	0
Proporcional integral derivativo	PID	$0.6 K_{cr}$	$P_{cr}/2$	$P_{cr}/8$

Tabla 8.1 Valores de los parámetros K_p , T_d y T_i para el método de Ziegler-Nichols de límite de estabilidad.

Con base en la tabla 8.1, para un controlador PID se tiene que:

$$K_p = 0.6 K_{cr}$$

$$T_i = 0.5 P_{cr}$$

$$T_d = 0.125 P_{cr}$$

Para aplicar el *método de límite de estabilidad*, se aplicó al sistema de control de nivel de líquido, de la figura 8.17, un escalón de 20 unidades. Al aumentar el valor de K_p , desde

cero, se encontró que para $K_p = 3.4$, la respuesta del sistema tiene oscilaciones sostenidas. En la figura 8.18 se muestra la respuesta del sistema cuando $K_p = 3.4$.

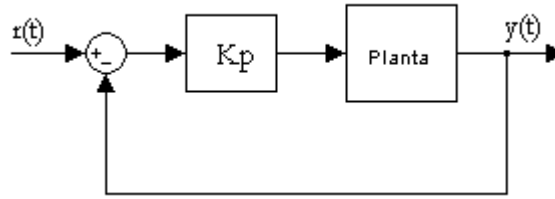


Figura 8.17 Sistema de lazo cerrado con un controlador proporcional.

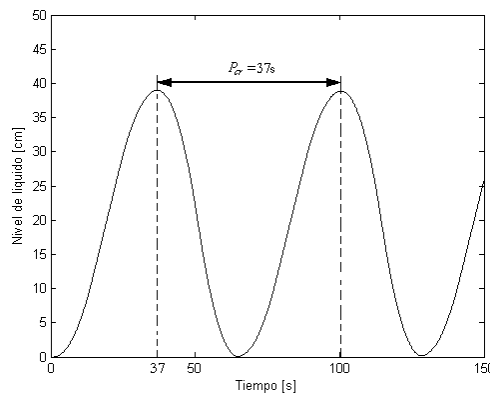


Figura 8.18 Para $K_p = 3.4$, se obtiene una respuesta con oscilaciones sostenidas.

Los resultados obtenidos fueron:

$$K_{cr} = 3.4 \quad K_{cr} = 3.4$$

$$P_{cr} = 100 - 37 = 63 [s]$$

$$K_p = (0.6)(3.4) = 2$$

$$T_i = (0.5)(63) = 31.5 [s]$$

$$T_d = (0.125)(63) = 7.9 [s]$$

$$K_p = 2$$

$$K_I = \frac{K_p}{T_i} = \frac{2}{31.5} = 0.063$$

$$K_D = K_p T_d = (2)(7.9) = 15.8$$

En la figura 8.19 se muestra la respuesta del sistema de nivel para una entrada escalón de 20 unidades, con el controlador PID diseñado, mediante el método de límite de estabilidad.

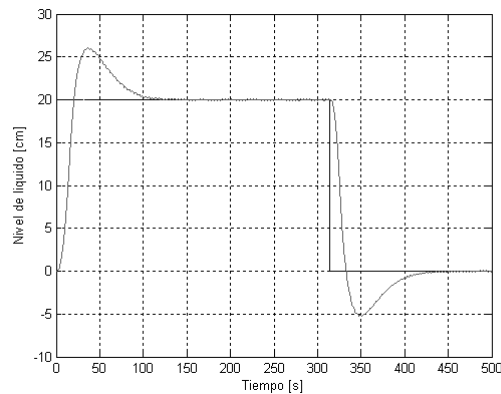


Figura 8.19 Respuesta escalón del sistema de nivel de líquido con el controlador PID diseñado mediante el método de límite de estabilidad.

Para que la respuesta del sistema de nivel, al escalón de veinte unidades, fuera críticamente amortiguada, se modificaron los parámetros del controlador PID, obtenidos anteriormente, hasta obtener la respuesta requerida. Los parámetros del controlador que cumplen con la especificación son:

$$K_p = 1$$

$$K_D = 3.4$$

$$K_I = 0$$

El controlador difuso PD+I cumple con la especificación cuando $k_p = k_d = 1$, $G_d = 1.3$ y $G_i = 0$. En las figuras 8.20 y 8.21 se muestra la respuesta del sistema de control difuso para cuatro valores de ganancia derivativa G_d , donde

k_p es el factor de escala proporcional

k_d es el factor de escala derivativo

G_d es la ganancia derivativa

G_i es la ganancia integral

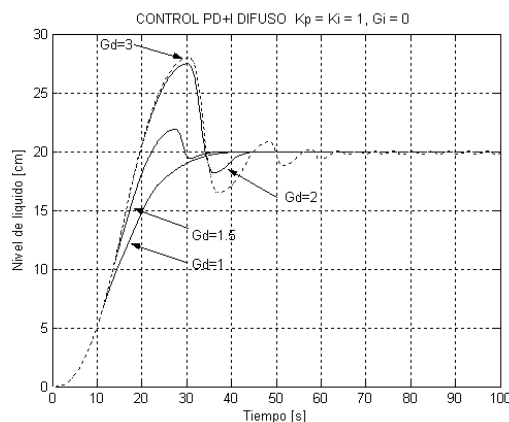


Figura 8. 20 Respuesta del sistema de control difuso para un escalón de 20 unidades.

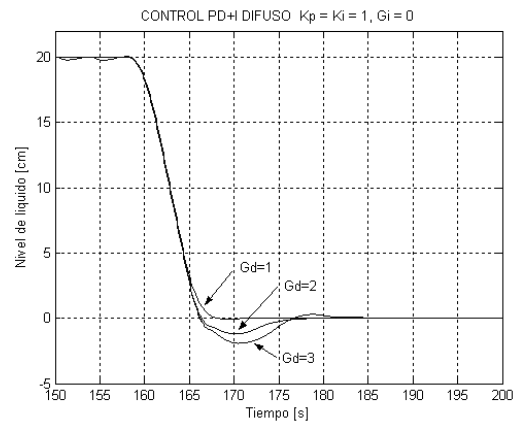


Figura 8. 21 Respuesta del sistema de control difuso para un escalón de 20 a 0 unidades.

En la figura 8.22 se muestran los resultados de la comparación de la respuesta del sistema de nivel de líquido con ambos controladores. La línea negra representa la respuesta del sistema de control difuso y la línea gris representa la respuesta del sistema de control analógico.

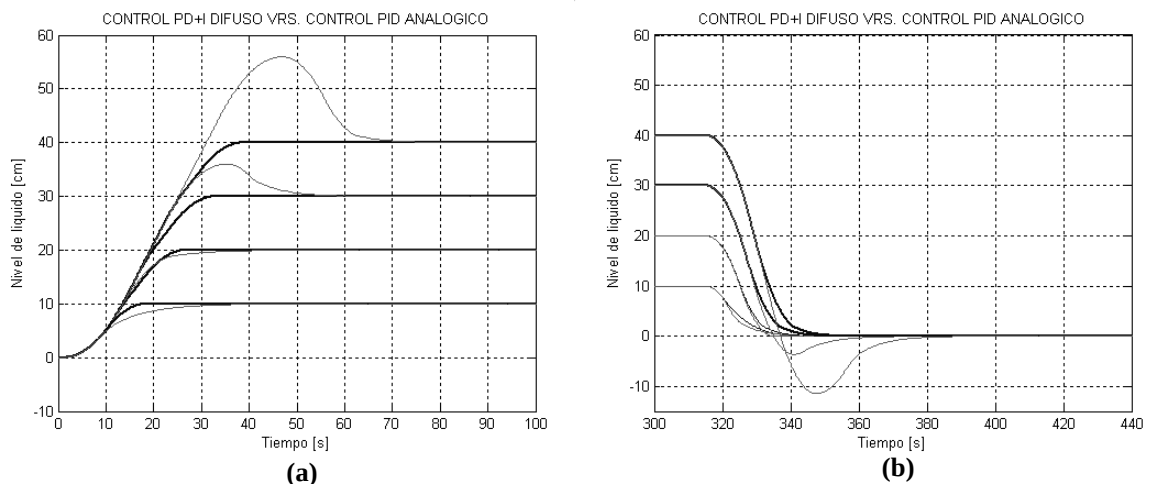


Figura 8.22 Gráficas teóricas del proceso de llenado (a) y del proceso de vaciado (b).

Las gráficas teóricas de carga y descarga de la figura 8.22, muestran que el comportamiento del controlador analógico es de la siguiente manera:

Cuando la referencia es menor que 20 unidades, la respuesta del sistema es subamortiguada. El amortiguamiento aumenta cuando el valor de referencia disminuye. Por lo tanto, cuando la referencia va disminuyendo la respuesta se hace más lenta.

Cuando la referencia es mayor de 20 unidades, la respuesta del sistema comienza a tener un sobrepaso, que crece cuando el valor de referencia aumenta.

Cuando el valor de referencia es de 20 unidades, la respuesta del sistema es aproximadamente igual a la del sistema de control difuso.

Con base en los resultados obtenidos en las gráficas de la figura 8.22, se concluye, que con el controlador difuso se obtiene una respuesta más rápida y sin sobrepaso.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

9.1 Resultados

Mediante la simulación, se determinó que la mejor respuesta del sistema de nivel de líquido, con el controlador difuso PD+I diseñado, se obtiene cuando $K_p=K_d=1$, $G_i=0$ y $G_d=1$. En la figura 9.1 se muestra la respuesta del sistema para una entrada escalón de 20 unidades.

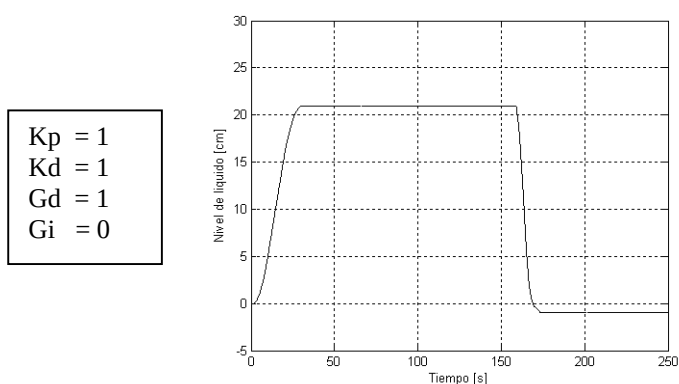


Figura 9.1 Respuesta del sistema de nivel de líquido para un escalón de 20 unidades con el controlador difuso diseñado, cuando $K_p=K_d=G_d=1$ y $G_i=0$.

Cuando el valor de la ganancia proporcional derivativa es $G_d=2$, la respuesta del sistema presenta un sobrepaso y algunas oscilaciones de amplitud decreciente, ver figura 9.2.

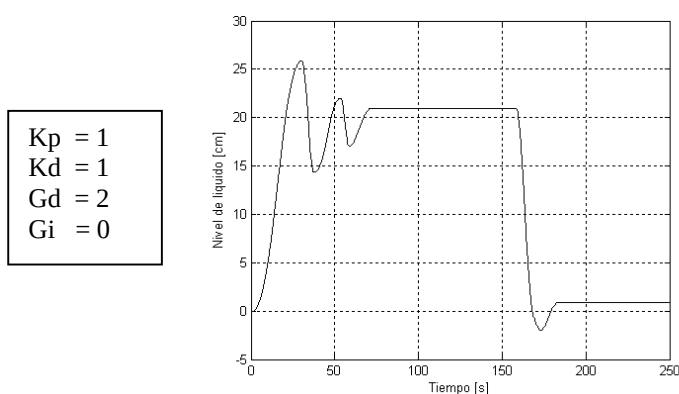


Figura 9.2 Respuesta del sistema de nivel de líquido para un escalón de 20 unidades con el controlador difuso diseñado, cuando $K_p=K_d=1$, $G_d=2$ y $G_i=0$.

Si la ganancia proporcional derivativa $G_d > 2$, la respuesta del sistema presenta un mayor sobrepaso y el número de oscilaciones comienza a incrementarse.

En las figuras 9.1 y 9.2 se puede observar también que con el controlador difuso PD+I, la respuesta del sistema se aproxima al valor de referencia. Se tiene un error máximo en estado estable de ± 0.9 unidades. Este error se debe principalmente a la representación digital de las variables de entrada/salida y al error que resulta en las operaciones matemáticas con números enteros en el microcontrolador.

Para el controlador difuso PD+I diseñado, si el valor de la ganancia integral G_i es diferente de cero, se presenta un gran sobrepaso y oscilaciones de gran amplitud. Esta inestabilidad se debe a que en el sistema de nivel de líquido, el tanque de agua se comporta de manera natural como una etapa integradora. Por lo tanto, al agregar una segunda etapa integradora externa, se tienen dos etapas de integración, haciendo que la respuesta del sistema de nivel de líquido sea inestable.

En la figura 9.3 se muestra el efecto adverso de la etapa integradora del controlador difuso PD+I en la respuesta del sistema, cuando el valor de la ganancia integral $G_i=0.1$ y $K_p=K_d=G_d=1$.

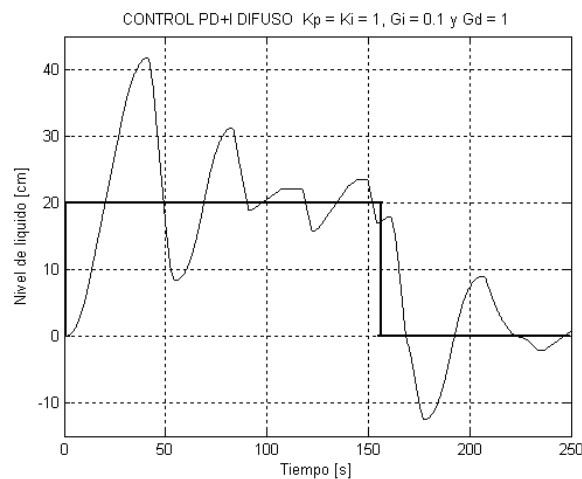


Figura 9.3 Respuesta del sistema de nivel de líquido para un escalón de 20 unidades con el controlador difuso diseñado cuando $K_p=K_d=1$, $G_d=1$ y $G_i=0.1$.

Se diseñó e implementó con éxito el controlador difuso PD+I para el sistema de nivel de líquido propuesto en este proyecto de tesis.

Las constantes de tiempo de las llaves causaron inestabilidad en el sistema de nivel al producir retardos de tiempo. Esta inestabilidad se solucionó sintonizando el controlador hasta obtener la respuesta deseada del sistema.

Para mostrar el funcionamiento del controlador difuso PD+I durante el proceso de llenado, se tomaron lecturas de nivel y tiempo para cuatro valores de referencia. Los resultados se muestran en la figura 9.4, se observa cómo el controlador difuso modifica la rapidez de llenado del tanque.

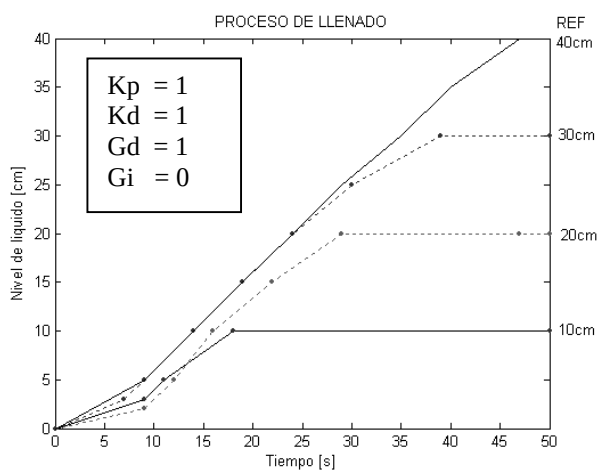


Figura 9.4 Gráficas experimentales del proceso de llenado.

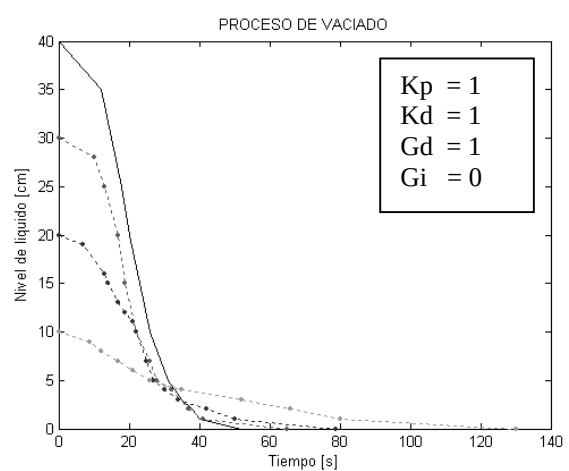


Figura 9.5 Gráficas experimentales del proceso de descarga.

Para mostrar el funcionamiento del controlador difuso durante el proceso de descarga, se vació el tanque a partir de un nivel de referencia dado y se anotaron los valores de nivel contra tiempo. Los resultados se muestran en la figura 9.2.

La respuesta escalón del sistema con el controlador difuso tiene una precisión de ± 0.9 cm con respecto al valor de referencia.

Cuando el valor de $K_d=K_p=1$, $G_i=0$ y $G_d > 1$ la respuesta escalón del sistema presenta un sobrepaso y oscilaciones de magnitud decrecientes.

Para una entrada escalón, cualquier valor de G_i diferente de cero en el controlador difuso, causa oscilaciones de gran amplitud en la respuesta del sistema.

Observaciones:

En las gráficas del proceso de vaciado del tanque, figura 9.2, se puede observar que cuando el nivel de líquido inicial disminuye, el tiempo de descarga aumenta. Este efecto se debe a que el flujo depende del nivel. Por o tanto, si el nivel es pequeño entonces el flujo también lo es y el tiempo de descarga aumenta.

Las llaves de control tardan mucho tiempo en abrirse o cerrarse. Esto limita la velocidad de respuesta del sistema.

Soluciones:

Para mejorar notablemente la rapidez de descarga se debe conectar el tanque con una bomba de desagüe.

Para incrementar la velocidad de respuesta de las llaves se puede acoplar directamente el motor al engrane de la llave y controlar la velocidad de éste con un circuito PWM.

9.2 Conclusiones

Los resultados teóricos obtenidos con la simulación de ambos controladores (difuso y analógico), muestran que con el controlador difuso propuesto para el sistema de nivel de líquido, se obtiene la respuesta más rápida y sin sobrepaso. En cambio, con el controlador PID analógico simulado se obtienen respuestas favorables para valores de referencia dentro del intervalo de 15 a 25 unidades. Para valores de referencia por debajo de 15 unidades presenta una respuesta sobreamortiguada, lo cual disminuye la rapidez de respuesta del sistema. Para valores de referencia mayores de 25 unidades, la respuesta comienza a presentar un sobrepaso que crece cuando el valor de referencia aumenta.

Es posible incrementar la exactitud del control al utilizar la PC como controlador difuso. Por lo tanto a mayor exactitud, mayor costo.

Si la exactitud no es tan importante y el sistema de interés tiene un modelo matemático no lineal o no se dispone del modelo matemático, entonces es preferible utilizar un controlador difuso.

Con las modificaciones mencionadas a las llaves de control para que respondan más rápido y con dos bombas de mayor potencia para llenar y vaciar el tanque, se puede mejorar notablemente la respuesta del sistema de nivel.

Si se agrega al sistema de control de nivel de líquido diseñado un sistema para adquirir datos para el flujo de entrada y de salida, y otro para el nivel de líquido, éste sistema podría utilizarse para realizar algunas prácticas de control difuso.

Por ultimo, la teoría de control difuso proporciona una herramienta más para resolver un problema de control. Esta herramienta tiene ventajas y desventajas con respecto a las tradicionales. Se puede aplicar la teoría de control difuso para resolver la mayoría de los problemas de control existentes pero no siempre será la opción más adecuada.

APENDICES

- **APENDICE A** **Datos experimentales**
- **APENDICE B** **Ejemplo de sintonización**
- **APENDICE C** **Programa de control difuso**
- **APENDICE D** **Diagramas**
- **APENDICE E** **Hojas de datos**

APENDICE A Datos experimentales

Para determinar el comportamiento de la posición de las llaves con respecto al tiempo, se midió el tiempo que tardan en abrirse y cerrarse, desde una posición dada. Los resultados se muestran en la tabla A1 y A2.

En la figura 1 se muestra la gráfica de la posición de la llave con respecto al tiempo, para el proceso abrir llave.

En la figura 2 se muestra la gráfica de la posición de la llave con respecto al tiempo, para el proceso cerrar llave.

Tiempo [s]	Posición
0	0
2	1
4	2
6	3
8	4
11	5
14	6
16	7
18	8

Tabla A1 Datos de posición y tiempo para el proceso abrir llave.

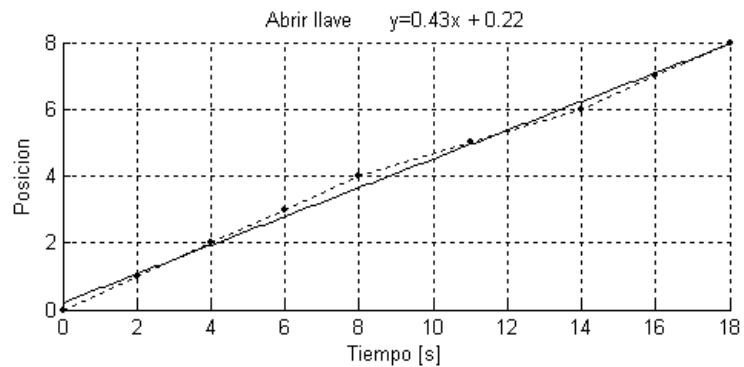


Figura 1 Gráfica de posición contra tiempo para el proceso abrir llave.

CERRAR	
Tiempo [s]	Posición
0	8
2	7
4	6
7	5
9	4
11	3
13	2
15	1
17	0

Tabla A2 Datos de posición y tiempo para el proceso cerrar llave.

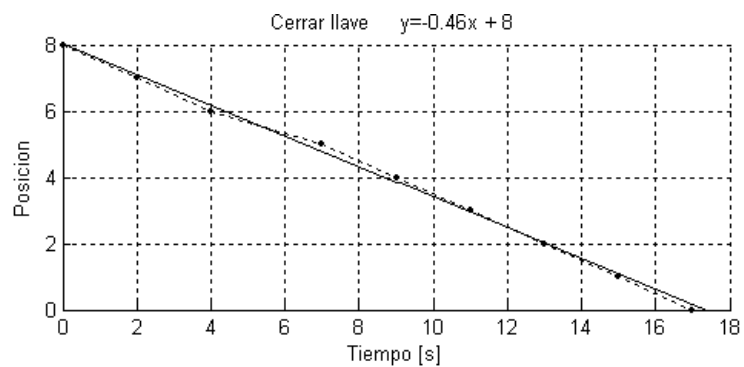


Figura 2 Gráfica de posición contra tiempo para el proceso cerrar llave.

Resultados:

Las llaves tardan en abrirse o cerrarse aproximadamente 18s. Requieren 2s para cambiar de una posición a otra contigua y la rapidez de cambio de la posición con respecto al tiempo es 0.44 posiciones por segundo.

Para determinar el comportamiento del nivel del líquido en el tanque durante el proceso de descarga o vaciado, se realizaron mediciones de tiempo y nivel para diferentes posiciones de abertura de la llave de descarga. Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Posición = 1		Posición = 2		Posición = 3		Posición = 4	
Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]
0	45	0	45	0	45	0	45
57	40	23	40	7	40	3	40
105	35	45	35	15	35	8	35
170	30	67	30	21	30	11	30
240	25	84	25	29	25	16	25
316	20	126	20	35	20	21	20
406	15	146	15	43	15	25	15
507	10	193	10	51	10	30	10
630	5	247	5	59	5	35	5
812	0	310	0	67	0	40	0

Posición = 5		Posición = 6		Posición = 7		Posición = 8	
Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]
0	45	0	45	0	45	0	45
4	40	2	40	2	40	2	40
7	35	5	35	4	35	3	35
10	30	7	30	6	30	5	30
13	25	10	25	9	25	7	25
17	20	13	20	11	20	9	20
21	15	16	15	14	15	11	15
24	10	19	10	17	10	13	10
28	5	22	5	20	5	15	5
32	0	25	0	22	0	17	0

En figura 3 se muestran las graficas de los resultados obtenidos durante el proceso de descarga del tanque.

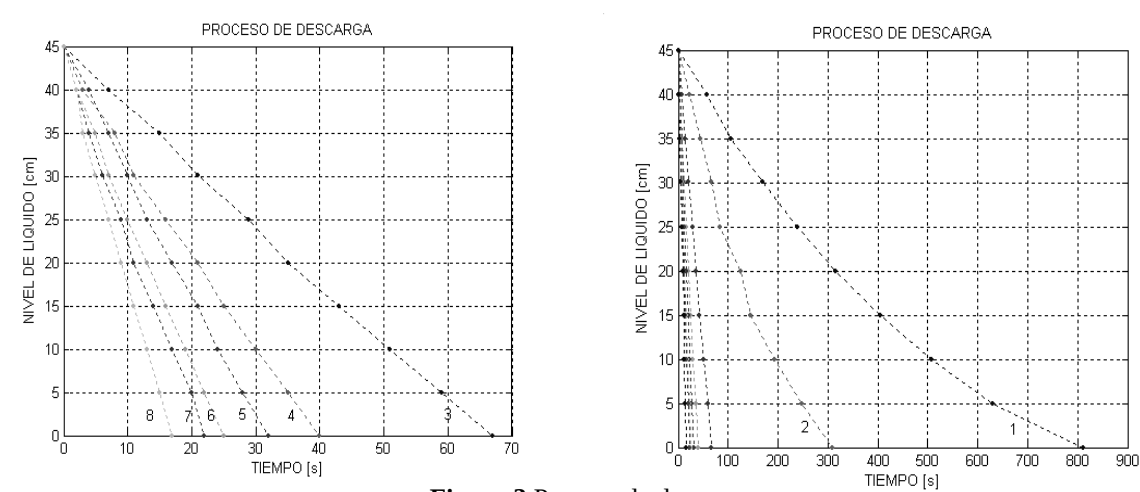


Figura 3 Proceso de descarga.

Para determinar el comportamiento del nivel del líquido en el tanque durante el proceso de carga o llenado, se realizaron mediciones de tiempo y nivel para diferentes posiciones de abertura de la llave de carga. Los resultados se muestran en las siguientes tablas

Posición = 1		Posición = 2		Posición = 3		Posición = 4	
Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]
x	0	0	0	0	0	0	0
x	5	9	5	8	5	7	5
x	10	17	10	14	10	12	10
x	15	23	15	20	15	18	15
x	20	33	20	26	20	24	20
x	25	41	25	31	25	29	25
x	30	48	30	38	30	35	30
x	35	57	35	45	35	39	35
x	40	65	40	51	40	45	40
x	45	72	45	56	45	51	45

Posición = 5		Posición = 6		Posición = 7		Posición = 8	
Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]	Tiempo [s]	Nivel [cm]
0	0	0	0	0	0	0	0
8	5	4	5	5	5	6	5
13	10	9	10	9	10	11	10
18	15	14	15	15	15	15	15
24	20	19	20	19	20	20	20
29	25	24	25	24	25	25	25
34	30	28	30	19	30	29	30
39	35	33	35	34	35	35	35
45	40	38	40	39	40	39	40
50	45	43	45	43	45	44	45

En la figura 4 se muestran las graficas del comportamiento del nivel de líquido con respecto al tiempo, cuando el tanque está siendo llenado.

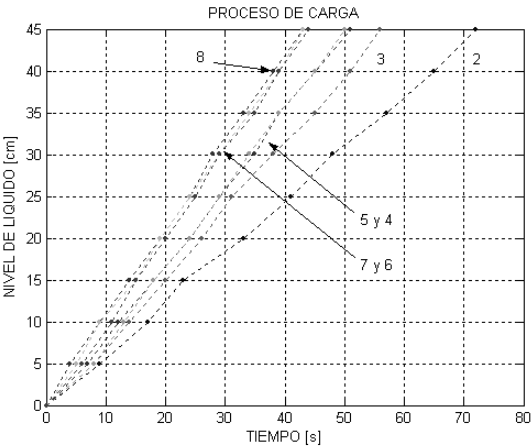


Figura 4 Proceso de llenado.

Para determinar la relación entre el flujo y el nivel del líquido, durante el proceso de descarga, se hizo el siguiente experimento: se ubica la llave de descarga en una posición definida y se le pone una restricción para que no permita el flujo de agua. Después se llena el tanque hasta un nivel de agua deseado. Luego se retira la restricción de la llave para que llene un recipiente de capacidad conocida. Para mantener el nivel de líquido constante se agrega agua al tanque. Se mide el tiempo que tarda el recipiente en llenarse. Por último se realiza el cociente de la capacidad con respecto al tiempo para obtener el flujo con respecto al nivel y la posición de la llave. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Posición = 1		Posición = 2		Posición = 3		Posición = 4	
Nivel [cm]	Flujo [lit/s]	Nivel [cm]	Flujo [lit/s]	Nivel [cm]	Flujo [lit/s]	Nivel [cm]	Flujo [lit/s]
45	0.04	45	0.08	45	0.12	45	0.18
40	0.04	40	0.08	40	0.12	40	0.18
35	0.04	35	0.08	35	0.12	35	0.16
30	0.04	30	0.07	30	0.11	30	0.15
25	0.3	25	0.07	25	0.11	25	0.15
20	0.02	20	0.06	20	0.1	20	0.12
15	0.02	15	0.06	15	0.08	15	0.1
10	0.02	10	0.04	10	0.06	10	0.09
5	0.01	5	0.02	5	0.04	5	0.06
0	0	0	45	0	0	0	0

Posición = 5		Posición = 6		Posición = 7		Posición = 8	
Nivel [cm]	Flujo [lit/s]	Nivel [cm]	Flujo [lit/s]	Nivel [cm]	Flujo [lit/s]	Nivel [cm]	Flujo [lit/s]
45	0.2	45	0.23	45	0.28	45	0.3
40	0.2	40	0.23	40	0.27	40	0.3
35	0.19	35	0.23	35	0.25	35	0.27
30	0.17	30	0.2	30	0.23	30	0.25
25	0.17	25	0.19	25	0.2	25	0.23
20	0.16	20	0.17	20	0.19	20	0.2
15	0.12	15	0.14	15	0.15	15	0.17
10	0.1	10	0.12	10	0.13	10	0.14
5	0.07	5	0.09	5	0.11	5	0.11
0	0	0	0	0	0	0	0

En la figura 5, se muestran las características de la variación del flujo con respecto al nivel del líquido en el tanque y la posición. Consta de 8 gráficas, las cuales corresponden a las diferentes posiciones de abertura de la llave. Estas gráficas se obtuvieron al medir el flujo de descarga, manteniendo el nivel constante.

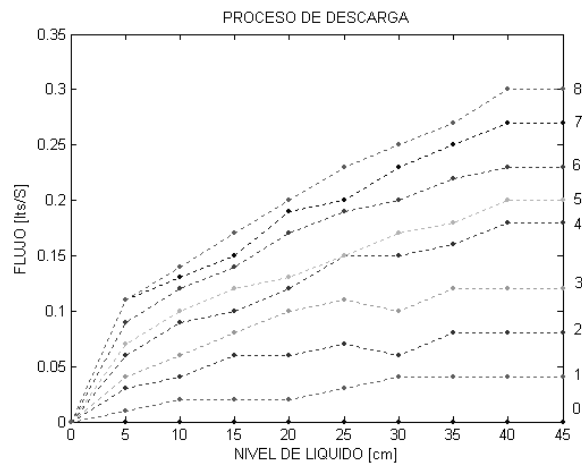


Figura 5 Variación del flujo con respecto al nivel de líquido en el tanque, durante el proceso de descarga, manteniendo la posición de la llave constante.

Resultados:

- La bomba tarda 1s para poder suministrar el flujo de llenado.
- Las llaves tardan en abrirse o cerrarse aproximadamente 18s
- La rapidez de cambio de la posición de las llaves con respecto al tiempo es 0.44 posiciones por segundo.
- Con la llave de carga totalmente abierta, el tanque vacío tarda en llenarse hasta 40cm aproximadamente 37s.
- Con la llave de descarga totalmente abierta, el tanque lleno tarda en vaciarse aproximadamente 17s.
- El flujo máximo de carga es de 0.16lit/s
- El flujo máximo de descarga es de 0.3 lit/s.

APENDICE B Ejemplo de sintonización

Para controlar al sistema de nivel de líquido, se utilizó un controlador proporcional. Se aplicó al sistema de control un escalón unitario y se incrementó el valor de la ganancia proporcional K_p desde cero hasta un valor de ganancia crítica K_{cr} , para el cual la respuesta escalón de la planta presenta oscilaciones sostenidas de periodo P_{cr} . En la figura B1, se muestra la respuesta oscilatoria del sistema.

$$K_{cr} = 4.07$$

$$P_{cr} = 78 - 63 = 14$$

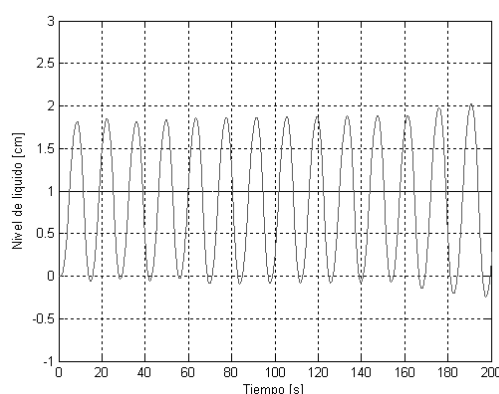


Figura B1 Respuesta oscilatoria del sistema cuando $K_p = K_{cr}$.

Los parámetros obtenidos para el controlador a partir de los valores K_{cr} y P_{cr} son:

$$K_p = 2$$

$$K_I = 0.32$$

$$K_D = 4.6$$

En la figura B2 se muestra la respuesta escalón del sistema, con los parámetros del controlador obtenidos.

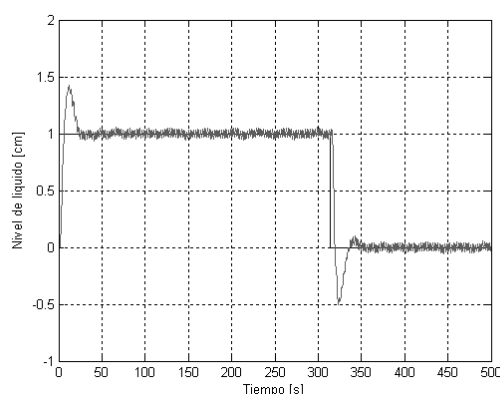


Figura B2 Respuesta escalón del sistema con los parámetros obtenidos del controlador PID con el método de limite de estabilidad.

En la figura B3 se muestra la respuesta del sistema para un escalón de 40 unidades. Se observa que el sistema se sale de control.

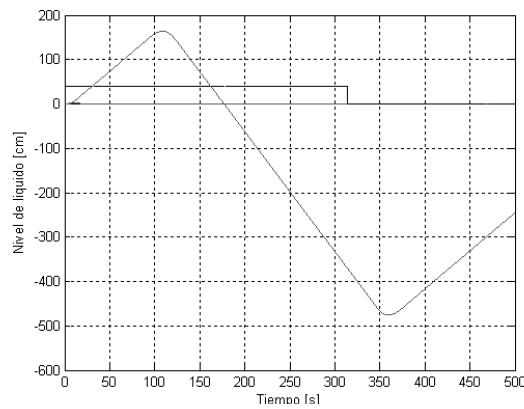


Figura B3 Respuesta al escalón, de 40 unidades, del sistema con los parámetros obtenidos con el método de límite de estabilidad.

En la figura B4 se muestra la respuesta del sistema cuando se iguala a cero la acción de control integral.

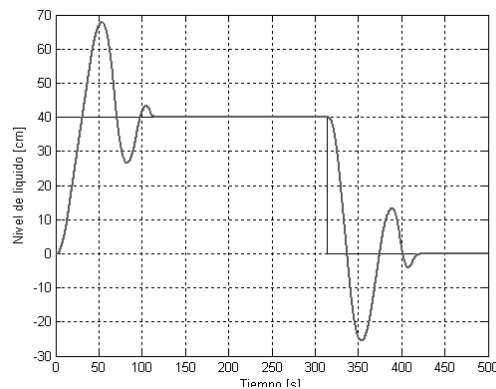


Figura B4 Respuesta al escalón, de 40 unidades, del sistema sin la acción de control integral.

Al aumentar el valor de la ganancia derivativa K_D de 4.6 a 22, manteniendo la ganancia proporcional constante, disminuyen las oscilaciones y el sobrepaso. En la figura B5 se muestra la respuesta del sistema cuando $P=2$, $K_D = 22$ y $K_I=0$ para el controlador PID.

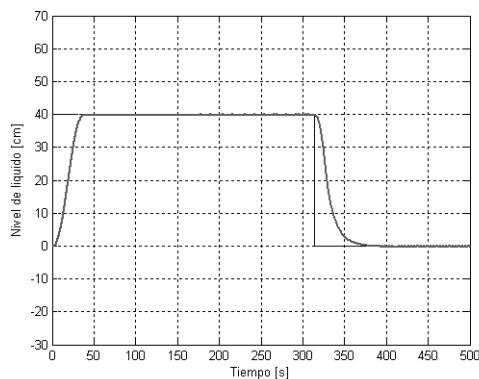


Figura B5 Respuesta al escalón, de 40 unidades, del sistema de nivel, con los parámetros $K_p = 2$, $K_I = 0$ y $K_D = 22$ para el controlador PID.

El controlador analógico PID cumple con la especificación cuando $P=2$, $KD = 22$ y $KI=0$.

El controlador difuso PD+I cumple con la especificación cuando $k_p = k_d = 1$, $G_d = 1.3$ y $G_i=0$, donde

k_p es el factor de escala proporcional

K_d es el factor de escala derivativo

G_d es la ganancia derivativa

G_i es la ganancia integral

Las figuras B6 y B7 muestran la comparación entre los sistemas de control, analógico y difuso, para algunos valores de referencia. La línea negra corresponde al sistema con el controlador difuso y la línea gris corresponde al sistema con el controlador analógico.

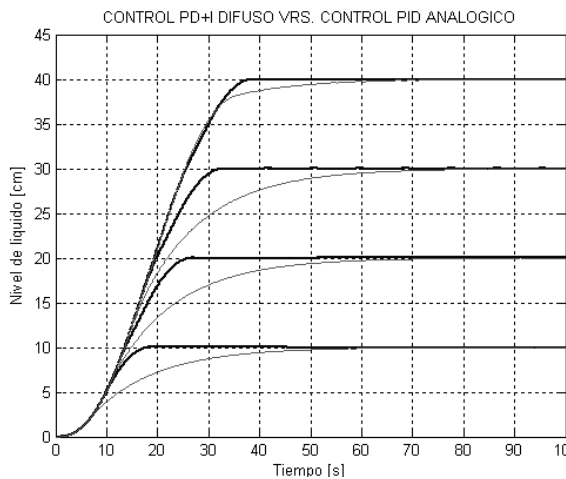


Figura B6 Respuesta del sistema de nivel de líquido, durante el proceso de llenado, con los controladores PID analógico y difuso diseñados.

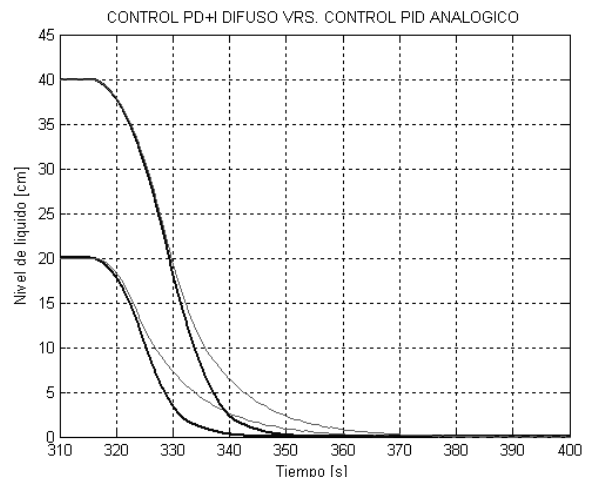


Figura B7 Respuesta del sistema de nivel de líquido, durante el proceso de descarga, con los controladores PID analógico y difuso diseñados.

APENDICE C

Programa de control difuso

```
,*****
;
;TABLAS DE DATOS
;*****
;TABLA DE ENTRADAS Y CJS POR ENTRADA

T_EYCJS      ORG          0X800          ;
              MULLW       0X02           ;
              MOVF         PRODL,0       ;
              ADDWF        PCL           ;
              DT           3DH           ;          E1 (ERR)
              DT           05H           ;          No. CJS
              DT           3EH           ;          E2 (DERR)
              DT           03H           ;          No. CJS
;*****
;TABLA DE PUNTOS Y PENDIENTES

T_PYP         MULLW       0X02
              MOVF         PRODL,0
              ADDWF        PCL
              DT           0X00,0XFF,0X30,0X05      ; EGN
              DT           0X30,0X05,0X60,0X07      ; EMN
              DT           0X60,0X07,0X81,0X0E      ; EZ
              DT           0X81,0X0E,0X9F,0X08      ; EMP
              DT           0X9F,0X08,0XFF,0XFF      ; EGP

              DT           0X00,0XFF,0X72,0X11      ; RN
              DT           0X72,0X11,0X81,0X11      ; RZ
              DT           0X81,0X11,0XFF,0XFF      ; RP
;*****
;TABLA DE CJS DIFUSOS DE ENTRADA

T_VDXCJ       MULLW       0X02
              MOVF         PRODL,0
              ADDWF        PCL
              DT           0X060          ; EGN
              DT           0X061          ; EMN
              DT           0X062          ; EZ
              DT           0X063          ; EMP
              DT           0X064          ; EGP

              DT           0X068          ; RN
              DT           0X069          ; RZ
              DT           0X06A          ; RP
;*****
;POSICIONES DE LAS SALIDAS DIFUSAS

T_SLIDAS      MULLW       0X02
              MOVF         PRODL,0
              ADDWF        PCL
              DT           0X80          ; VALVULAS
              DT           0X81          ; AM_B
              DT           0X82          ; AP_B
              DT           0X83          ; CERRAR
              DT           0X84          ; AP_A
              DT           0X84          ; AM_A
;*****
; POSICION DE LOS SINGLETONS DE SALIDA

T_POSLIDAS    MULLW       0X02
              MOVF         PRODL,0
              ADDWF        PCL
              DT           0X08;
              DT           0X04;
              DT           0X00;
              DT           0X04;
              DT           0X08;
```

```
,*****
```

``` ; ; TABLA DE REGLAS ```

```
T_REGLAS      ORG      0X900  
               MULLW    0X02  
               MOVF      PRODL,0  
               ADDWF     PCL  
               DT 0X80  
               DT 0X80  
               DT 0X80  
               DT 0X81  
               DT 0X81  
               DT 0X81  
               DT 0X81  
               DT 0X82  
               DT 0X83  
               DT 0X83  
               DT 0X83  
               DT 0X83  
               DT 0X84  
               DT 0X84  
               DT 0X84
```

```
,*****
```

``` ; ; RUTINA DE CONTROL DIFUSO ```

```
FuzKernel      MOVLW     0X08  
               MOVWF     PCLATH      ; PCLATH = 6.  
               CALL      DIFUSION    ; LLAMA A LA RUTINA DIFUSION.  
               CALL      REGLAS      ; LLAMA A LA RUTINA REGLAS.  
               CALL      DESDIF       ; LLAMA A LA RUTINA DESIFUSION.  
               CALL      LLAVES       ; LLAMA A LA RUTINA LLAVES.  
               CALL      INTERGRA     ; LLAMA A LA RUTINA DE INTEGRACION.  
               CLRF       PCLATH      ; PCLATH = 0.  
               RETURN
```

```
,*****
```

``` ; ; RUTINA DE DIFUSION ```

```
DIFUSION  
CLRM1          CLRF      APX          ; LIMPIA REGISTRO APX.  
               MOVF      APX,W        ; W ← APX.  
               CALL      T_VDXCJ      ; LLAMA A LA TABLA T_VDXCJ.  
               MOVWF     FSR0L        ; FSR0L ← W.  
               CLRF      INDF0        ; LIMPIA REGISTRO.  
               INCF      APX          ; APX ← APX+1.  
               MOVLW     0X08          ; TOTAL DE CJS. DE ENTRADA = 8.  
               CPFSEQ    APX          ; APX=8?  
               GOTO      CLRM1        ; NO, VE A LA ETIQUETA CLRM1.  
               ; SI, SIGUE PROGRAMA.  
               CLRF      APX          ; LIMPIA REGISTRO APX.  
               CLRF      APY          ; LIMPIA REGISTRO APY.  
               CLRF      APZ          ; LIMPIA REGISTRO APZ.  
ITERA4          MOVF      APX,W        ; APX, APUNTA A LA TABLA T_EYCJS.  
               CALL      T_EYCJS      ; APX APUNTA A UNA ENTRADA  
               MOVWF     FSR0L        ; Y LA COLOCA EN EL REGF X_CRISP.  
               MOVFF     INDF0,X_CRISP ; X_CRISP ← INDF0.  
               INCF      APX          ; APX=APX+1 (APX APUNTA AL NUMERO DE CONJUNTOS  
               MOVF      APX,W        ; DE LA ENTRADA Y COLOCA EL VALOR EN  
               CALL      T_EYCJS      ; EN EL REGF N_CJS).  
               MOVWF     N_CJS        ; N_CJS ← W  
ATRAS1          CALL      PROCESO     ; LLAMA AL PROCESO DE DIFUSION.  
               INCF      APY          ; APY ← APY + 1.  
               DECFSZ    N_CJS        ; N_CJS - 1 = 0?  
               GOTO      ATRAS1      ; NO, VE A LA ETIQUETA ATRAS1.  
               INCF      APX          ; SI, APX ← APX+1.  
               MOVLW     0X04          ; W ← 0x04  
               CPFSEQ    APX          ; SE HIZO LA DIFUSION PARA TODAS LAS ENTRADAS?  
               GOTO      ITERA4      ; NO, VE A ITERA4.  
               RETURN              ; SI, REGESA.  
  
PROCESO        MOVLW     0X3F          ; W ← 0x3F.  
               MOVWF     FSR0L        ; AP. FSR0L <-- DIRECCION DEL PUNTO P1.  
LDPYP          MOVF      APZ,W        ; POR MEDIO DEL APZ ACCEDEMOS A UN DATO  
               CALL      T_PYP        ; DE LA TABLA T_PYP, EL DATO ES GUARDADO  
               MOVWF     INDF0        ; EN LA DIRECCION QUE INDICA EL AP. FER0L.  
               INCF      FSR0L        ; FSR0L = FSR0L+1.  
               INCF      APZ          ; APZ = APZ+1.  
               MOVLW     0X43          ; W ← 0x43  
               CPFSEQ    FSR0L        ; ¿FSR0L=43H? O ¿SE HAN LEIDO LOS PTOS Y PEND DE UN CJT?
```

	GOTO	LDPYP	; NO, REGRESA A LDPYP. SI, SALTA.
	MOVF	P1,W	; SI, W <-- P1.
	MOVFF	X_CRISP,DIF1	; DIF1 <-- X_CRISP.
	MOVFF	X_CRISP,DIF2	; DIF2 <-- X_CRISP.
	SUBWF	DIF1,F	; DIF1 = DIF1-W (X_CRISP-P1).
	BTFSS	STATUS,C	; HAY ACARREO?
	BTFSC	DIF1,7	; ¿ DIF1<0 ? NO, SALTA.
	GOTO	SEG1	; SI, VE A SEG1.
	MOVF	P2,W	; W <-- P2.
	SUBWF	DIF2,F	; DIF2 = DIF2-W (X_CRISP-P2).
	BTFSS	STATUS,C	;
	BTFSC	DIF2,7	; ¿ DIF2<0 ? NO, SALTA.
	GOTO	SEG2	; SI, VE A LA ETIQUETA SEG2.
	GOTO	SEG3	; VE A LA ETIQUETA SEG3.
UNION	MOVF	APY,W	; W <-- APY.
	CALL	T_VDXCJ	; LLAMA A LA TABLA T_VDXCJ.
	MOVWF	FSR0L	; FSR0 <-- W.
	MOVFF	MU_X,INDF0	; MU_X <-- INDF0.
	RETURN		
SEG1	CLRF	MU_X	; MU_X = 0.
	GOTO	UNION	; VE A ETIQUETA UNION.
SEG2	MOVF	S1,W	; W <-- S1.
	MULWF	DIF1,1	; DIF1*S1.
	MOVF	PRODH,F	; PRODH ← PRODH.
	BTFSC	PRODL,7	; ¿ PRODL > 7F ? SI, SALTA
	BTFSS	STATUS,Z	; NO, PRODH=0?
	GOTO	SEG2A	; NO, VE A SEG2A
	MOVFF	PRODL,MU_X	; SI, MU_X <-- PRODL.
	GOTO	UNION	; VE A UNION
SEG2A	MOVLW	0XFF	; W ← 0XFF.
	MOVWF	MU_X	; MU_X = W.
	GOTO	UNION	; VE A ETIQUETA UNION.
SEG3	MOVF	S2,W	; W <-- S2
	MULWF	DIF2,1	; DIF2*W
	MOVF	PRODH,F	; PRODH ← PRODH.
	BTFSS	STATUS,Z	; PRODH = 0 ? SI, SALTA INSTARUCCION.
	GOTO	CLRMU_X	; NO, VE A CLRMU_X
	MOVLW	0XFF	; W ← FF
	MOVWF	MU_X	; MU_X = 7F
	MOVF	PRODL,W	; W <-- PRODL
	SUBWF	MU_X,F	; MU_X = MU_X-W
	GOTO	UNION	; VE A UNION
CLRMU_X	CLRF	MU_X	; MU_X=0
	GOTO	UNION	; VE A UNION

;AL TERMINAR LA RUTINA DE DIFUSION SE PUEDEN REUSAR LOS APUNTADES
;APX, APY, Y APZ.

; RUTINA DE EVALUACION DE REGLAS

REGLAS	CLRF	APZ	; APZ = 0
	CLRF	REG_INT	; REG_INT=0
	CLRF	APX	; APX = 0

LIMPIAR	MOVF	APX,W	; W ← APX.
	CALL	T_SLIDAS	; LLAMA A LA TABLA T_SLIDAS.
	MOVWF	FSR0L	; FSR0L ← W.
	CLRF	INDF0	; LIMPIAR REGISTRO.
	INCF	APX	; APX + 1.
	MOVLW	0X05	; <-- PONER No. TOT. DE CONJUNTOS DE SALIDA.
	CPFSEQ	APX	; APX = 0?
	GOTO	LIMPIAR	; NO, VE A ETIQUETA LIMPIAR.

	APZ INDICA EL NO DE REGLA		
	MOVLW	0X09	
	MOVWF	PCLATH	; PCLATH = 09
	MOVLW	0X60	; APX APUNTA A LOS CONJUNTOS DIFUSOS DE
	MOVWF	APX	; LA ENTRADA E1 EN LA TABLA (T_VDXCJ).
REGLAM	MOVLW	0X68	; APY APUNTA A LOS CONJUNTOS DIFUSOS DE
	MOVWF	APY	; LA ENTRADA E2 EN LA TABLA (T_VDXCJ).
REGLA	MOVFF	APX,FSR0L	; MANDA EL VALOR DIFUSO DEL CJTOi DE
	MOVFF	INDF0,NUM1_L	; LA ENTRADA E1 AL REGF. NUM1.
	MOVFF	APY,FSR0L	; MANDA EL VALOR DIFUSO DEL CJTOj DE
	MOVFF	INDF0,NUM2_L	; LA ENTRADA E2 AL REGF NUM2.
	CALL	ORDENA	; EL VALOR MENOR LO PONE EN NUM1.
	MOVF	APZ,W	; APZ APUNTA A LA TABLA DE REGLAS Q CONTIENE LOS

```

CALL      T_REGLAS      ; CONJUNTOS DIFUSOS DE SALIDA.
MOVWF     FSR0L         ; APZ APUNTA AL CONJUNTO DE SALIDA n
MOVFF     INDF0,NUM2_L  ; Y SU VALOR LO PONE EN EL
CALL      ORDENA        ; REGF NUM2.
MOVFF     NUM2_L,INDF0  ; DEJA EL VALOR MAXIMO EN EL REGF NUM2
INCF      APZ,F         ; Y LO COPIA EN EL CONJUNTO DE SALIDA n.
INCF      REG_INT       ; APZ+1 APUNTA A LA SIGUIENTE REGLA.
MOVLW     0X01         ; REG_INT ES EL CONTADOR DE CONSECUENTES (2)
CPFSEQ    REG_INT       ; ESTE VALOR ES 2
GOTO      REGLA         ; REG_INT=2 ? NO, REGRESA A REGLA
CLRF      REG_INT       ; SI, SALTA SIGUIENTE INSTRUCCION.
INCF      APY           ; REG_INT=0
MOVLW     0X6B         ; APY + 1
CPFSEQ    APY           ; LOCALIDAD FINAL DE AP_ED2 + 1
GOTO      REGLA         ; APY=6D ? NO, VE A REGLA.
INCF      APX           ; SI, SALTA SIGUIENTE INSTRUCCION.
MOVLW     0X65         ; APX + 1
CPFSEQ    APX           ; LOCALIDAD FINAL DE AP_ED1 + 1
GOTO      REGLAM        ; APX=65 ? NO, VE A REGLAM.
RETURN    REGLAM        ; SI, SALTA SIGUIENTE INSTRUCCION.
; REGRESA

;-----
;COLOCA NUMERO MAYOR EN NUM2 Y EL MENOR EN NUM1

ORDENA    MOVF          NUM1_L,W      ; CARGA W <-- NUM1
          SUBWF         NUM2_L,W      ; W = NUM2 - NUM1
          BTFSC         STATUS,C      ; C=1 SI NUM2 > NUM1
          RETURN        ; REGRESA SI Num2 > Num1

REG_AUX   MOVFF         NUM1_L,REG_AUX ; EN OTRO CASO, ALMACENA NUM1 EN
          MOVFF         NUM2_L,NUM1_L ; COPIA NUM2 EN NUM1
          MOVFF         REG_AUX,NUM2_L ; COPIA REG_AUX EN NUM2
          RETURN        ; REGRESA.

;-----
;*****
;*****;CALCULO DE LA Z*
;*****
;RUTINA DE DESDIFUSION, EN LA CUAL SE OBTIENE
;UN VALOR CRISP EN EL REG. Z1
;*****
DESDIF    MOVLW         0X08
          MOVWF         PCLATH        ; PCLATH = 8.
Z_CRISP   CLRF          APX           ; LIMPIA APX.
          CLRF          NUM2_L        ; LIMPIA NUM2_L.
          CLRF          NUM2_H        ; LIMPIA NUM2_H.
          CLRF          NUM1_L        ; LIMPIA NUM1_L.
          CLRF          RNUM          ; LIMPIA RNUM.
          CLRF          RDN           ; LIMPIA RDN.
BBAKI     MOVF          APX,W         ; C.I: APX=0, (0 <= APX <= 5).
          CALL          T_SLIDAS      ; LLAMA A LA TABLA T_SLIDAS..
          MOVWF         FSR0L        ; FSROL <= W.
          MOVFF         INDF0,RNUM    ; RNUM <= u(Zi).

;-----
          MOVF          INDF0,W        ; NUM1_L = NUM1_L+u(Zi)
          ADDWF         NUM1_L,F      ;
          BTFSC         STATUS,C      ;
          SETF          NUM1_L        ; NUM1= FF

;-----
          MOVF          APX,W         ; AP. A LA TABLA DE SINGLETONS.
          CALL          T_POSLIDAS    ; LLAMA A LA TABLA T_POSLIDAS.
          MULWF         RNUM          ; RNUM=Zi*u(Zi).
          MOVF          PRODL,W       ; W <= PRODL.
          ADDWF         NUM2_L        ; NUM2_L = NUM2_L + Zi*u(Zi).
          BTFSC         STATUS,C      ; HAY ACARREO EN LA SUMA?
          INCF          NUM2_H        ; SI, ENTONCES, NUM2_H + 1.
          MOVF          PRODH,W       ; W <= PRODH.
          ADDWF         NUM2_H        ; NUM2_H <= NUM2_H + W
          INCF          APX           ; APX = APX + 1
          MOVLW         0X03         ; APX = 05H?
          CPFSEQ        APX          ; SI, SALTA.
          GOTO          BBAKI        ; NO, VE A BAKI.
          CALL          DIVIDE        ; LLAMA A LA RUTINA DIVIDE.
          MOVLW         0XFF         ; W <= FF.
          CPFSLT        RESULT_L     ; RESULT_L < W.
          CLRF          RESULT_L      ; NO, LIMPIA REGISTRO RESULT_L.
          MOVFF         RESULT_L,Z1   ; SI, Z1 <= RESULT_L.

;-----
;*****
          MOVLW         0X7E         ;
          XORWF         ERR,W         ;
          BTFSC         STATUS,Z      ; W=7E?
          GOTO          NOICPO1      ; SI, VE A ETIQUETA NOICPO1.

```

```

; NO, CONTINUA PROGRAMA.
ATLAS1    MOVFF      Z1,NUM2_L      ; NUM2_L ← Z1.
          MOVF       Z_ANT,W        ; W ← Z_ANT.
          ADDWF      NUM2_L         ; NUM2_L ← W.
          MOVLW      0X02           ; W ← 0x02.
          MOVWF      NUM1_L         ; NUM1_L ← W.
          CLRF       TEMP_L         ; ANTES DE USAR DIV8X8 USAR
          CALL       DIV8X8         ; LIMPIAR TEMP_L.
          MOVFF      RESULT_L,INT    ; INT ← RESULT_L.
          MOVF       INT_ANT,W       ; INT_ANT ← W.
          ADDWF      INT             ; INT= (Z1+Z_ANT)/2+INT_ANT.
          MOVFF      Z1,Z_ANT        ; Z1 --> Z_ANT.

          MOVLW      0X05           ; W ← 0x05.
          MOVWF      NUM1_L         ; NUM1_L ← W.
          MOVFF      INT,NUM2_L      ; NUM2_L ← INT.
          CLRF       TEMP_L         ; LIMPIA REGISTRO TEMP_L.
          CALL       DIV8X8         ; LLAMA A LA RUTINA DIV8X8.
          MOVFF      RESULT_L,INT    ; INT= INT/0X05.
          MOVF       INT,W          ; W ← INT.
          ADDWF      Z1,W           ; Z1 + W.
          MOVWF      VB             ; VB = INT + Z1.

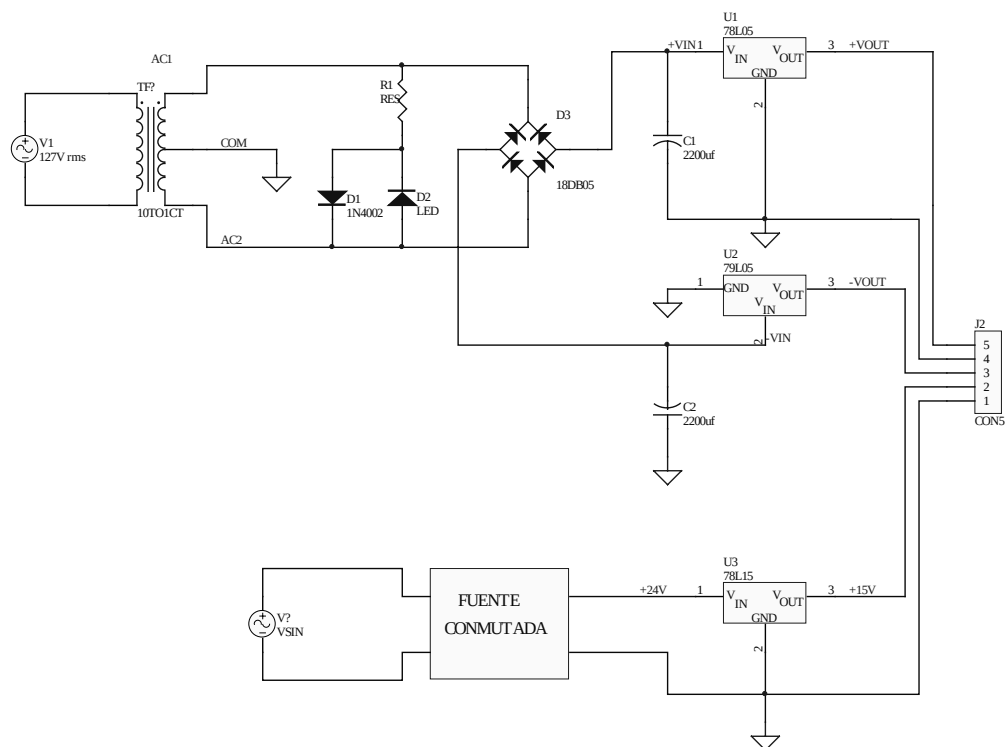
          MOVLW      0X08           ; W ← 0x08.
          CPFSLT     VB             ; VB < W ?
          MOVWF      VB             ; NO, VB ← W.
          MOVFF      INT,INT_ANT     ; SI, INT_ANT ← INT.
          GOTO       ATLAS          ; VE A ETIQUETA ATLAS.

NOICPO1    MOVLW      0X01           ; W ← 0x01.
          ADDWF      Z1             ; W+Z1.
          GOTO       ATLAS1         ; VE A ETIQUETA ATLAS1.
;*****
ATLAS      DECF       APX           ; APX ← APX-1.
          CLRF       NUM2_L         ; LIMPIA REGISTRO NUM2_L.
          CLRF       NUM2_H         ; LIMPIA REGISTRO NUM2_H.
          CLRF       NUM1_L         ; LIMPIA REGISTRO NUM1_L.
          CLRF       RNUM           ; LIMPIA REGISTRO RNUM.
          CLRF       RDEN           ; LIMPIA REGISTRO RDEN.
BBAKIN     MOVF       APX,W         ; C.I: APX=0, (0 ≤ APX ≤ 5).
          CALL       T_SLIDAS        ; LLAMA A LA RUTINA T_SLIDAS.
          MOVWF      FSR0L          ; FSR0L ← W.
          MOVFF      INDF0,RNUM      ; RNUM ← u(Zi).
;-----
          MOVF       INDF0,W         ; NUM1_L = NUM1_L+u(Zi).
          ADDWF      NUM1_L,F        ; NUM1_L + W.
          BTFSC      STATUS,C        ; NUM1_L > FF?
          SETF       NUM1_L         ; SI, NUM1_L ← 0XFF.
          ; NO, CONTINUA.
;-----
          MOVF       APX,W          ; W ← APX. APUNTA A LA TABLA DE
          ; SINGLETONS.
          CALL       T_POSLIDAS      ; LLAMA A LA TABLA T_POSLIDAS.
          MULWF      RNUM            ; Zi*u(Zi).
          MOVF       PRODL,W         ; W ← PROD_L.
          ADDWF      NUM2_L          ; NUM2_L = NUM2_L + Zi*u(Zi).
          BTFSC      STATUS,C        ; HAY ACARREO EN LA SUMA?
          INCF       NUM2_H          ; SI, ENTONCES NUM2_H + 1.
          MOVF       PRODH,W         ; NO, W ← PROD_H.
          ADDWF      NUM2_H          ; NUM2 ← NUM2_H + W.
          INCF       APX             ; APX = APX + 1.
          MOVLW      0X05           ; APX = 05H?
          CPFSEQ     APX            ; SI, SALTA.
          GOTO       BBAKIN         ; NO, VE A BAKI.
          CALL       DIVIDE          ; LLAMA A LA RUTINA DIVIDE.
          MOVLW      0XFF           ; W ← FF.
          CPFSLT     RESULT_L        ; RESULT < W?
          CLRF       RESULT_L        ; NO, LIMPIA RESULT_L.
          MOVFF      RESULT_L,Z2     ; SI, Z2 ← RESULT_L.
          MOVLW      0X84           ; W ← 84.
          XORWF      ERR,W           ; W ← (ERR) XOR (W).
          BTFSC      STATUS,Z        ; ERR=84.
          GOTO       CORR           ; VE A ETIQUETA CORR.
CORR1      MOVFF      Z2,VA          ; VA ← Z2.
          RETURN                    ; REGRESA.
CORR       MOVLW      0X01           ; W ← 0x01.
          ADDWF      Z2             ; Z2 ← W + Z2.
          GOTO       CORR1          ; VE A ETIQUETA CORR1.
;*****
;

```

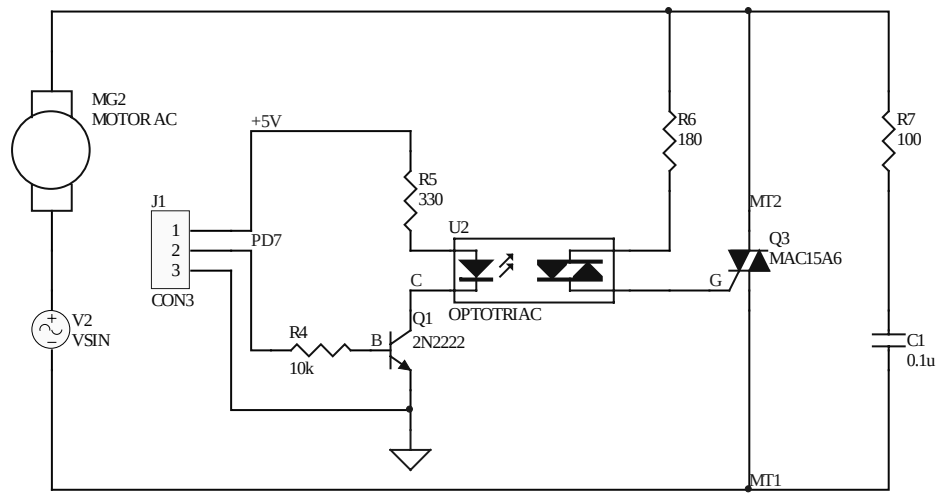
APENDICE D Diagramas

Fuentes de alimentación



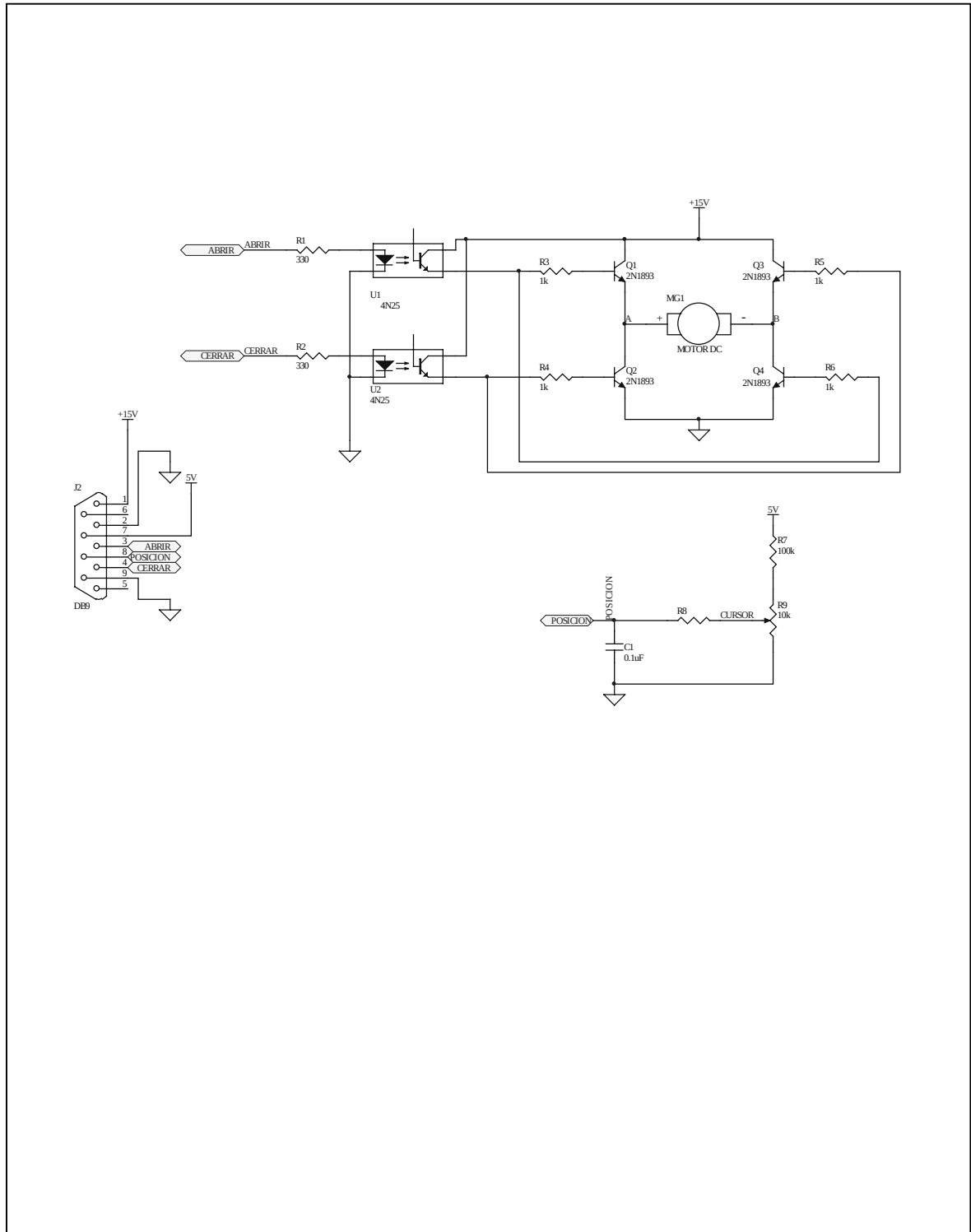
Diagramas

Circuito de encendido de la bomba de agua



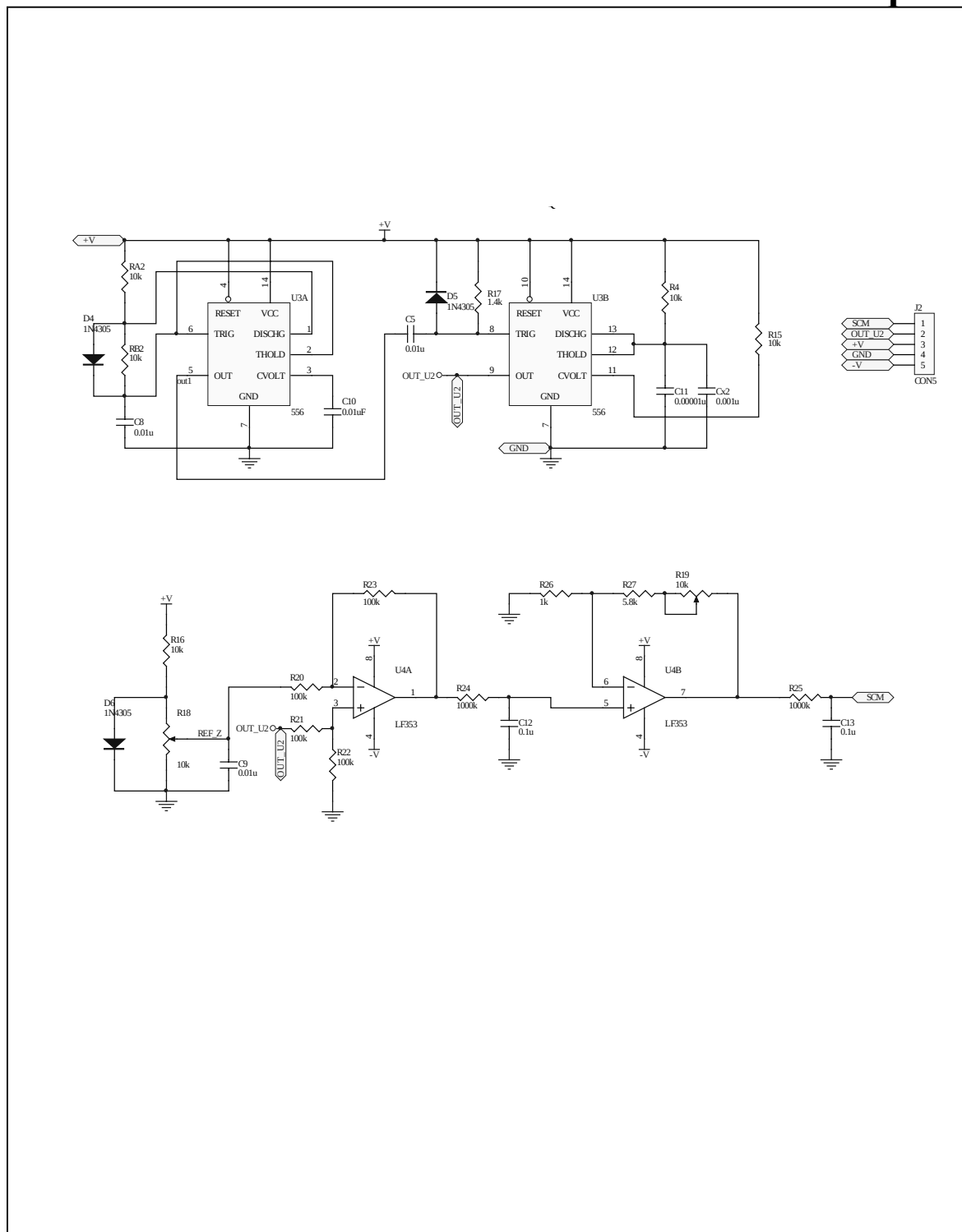
APENDICE D Diagramas

Actuador de las válvulas



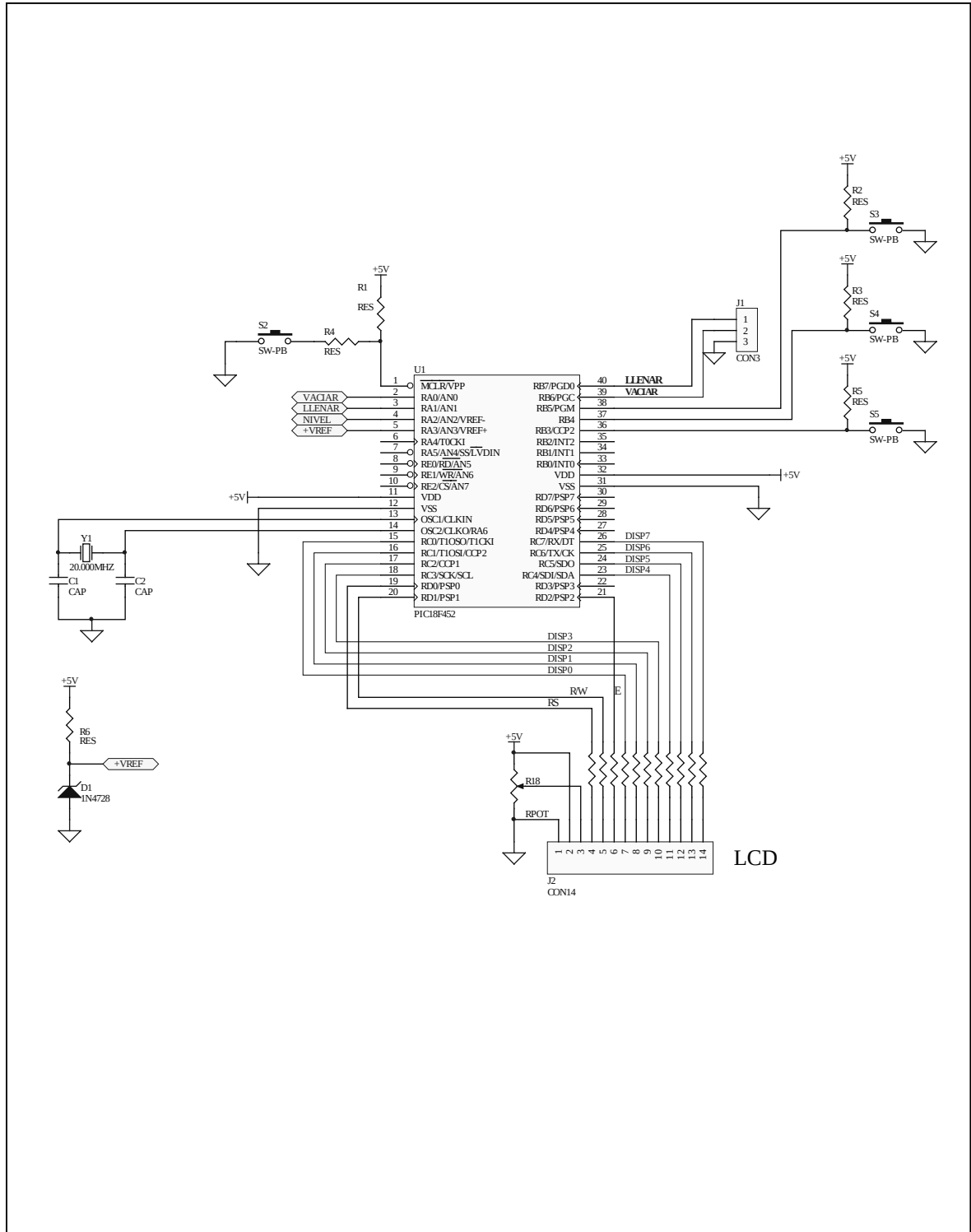
APENDICE D Diagramas

Sensor capacitivo de nivel de líquido



APENDICE D Diagramas

Diagrama de conexiones del PIC18F452



APENDICE E Hojas de datos

- **LF353**
- **LM385B**
- **MPS2222**
- **TIP41B/TIP42B**
- **MAC223C**
- **LM556**
- **PIC18F452**



JFET Input Operational Amplifiers

These low cost JFET input operational amplifiers combine two state-of-the-art analog technologies on a single monolithic integrated circuit. Each internally compensated operational amplifier has well matched high voltage JFET input devices for low input offset voltage. The JFET technology provides wide bandwidths and fast slew rates with low input bias currents, input offset currents, and supply currents.

These devices are available in single, dual and quad operational amplifiers which are pin-compatible with the industry standard MC1741, MC1458, and the MC3403/LM324 bipolar devices.

- Input Offset Voltage of 5.0 mV Max (LF347B)
- Low Input Bias Current: 50 pA
- Low Input Noise Voltage: $16 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide Gain Bandwidth: 4.0 MHz
- High Slew Rate: $13 \text{ V}/\mu\text{s}$
- Low Supply Current: 1.8 mA per Amplifier
- High Input Impedance: $10^{12} \Omega$
- High Common Mode and Supply Voltage Rejection Ratios: 100 dB

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V_{CC} V_{EE}	+18 -18	V
Differential Input Voltage	V_{ID}	± 30	V
Input Voltage Range (Note 1)	V_{IDR}	± 15	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	t_{SC}	Continuous	
Power Dissipation at $T_A = +25^\circ\text{C}$ Derate above $T_A = +25^\circ\text{C}$	P_D $1/\theta_{JA}$	900 10	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to $+70$	$^\circ\text{C}$
Operating Junction Temperature Range	T_J	115	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to $+150$	$^\circ\text{C}$

NOTES: 1. Unless otherwise specified, the absolute maximum negative input voltage is limited to the negative power supply.
2. Any amplifier output can be shorted to ground indefinitely. However, if more than one amplifier output is shorted simultaneously, maximum junction temperature rating may be exceeded.

LF347, B LF351 LF353

FAMILY OF JFET OPERATIONAL AMPLIFIERS

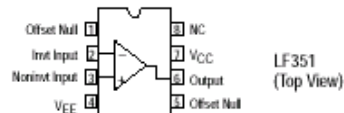


N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626

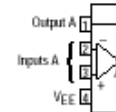


D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751
(SO-8)

PIN CONNECTIONS



LF351
(Top View)

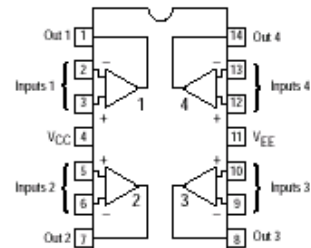


LF353
(Top View)



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 646

PIN CONNECTIONS



(Top View)

ORDERING INFORMATION

Device	Function	Operating Temperature Range	Package
LF351D LF351N	Single Single	$T_A = 0^\circ \text{ to } +70^\circ\text{C}$	SO-8 Plastic DIP
LF353D LF353N	Dual Dual		SO-8 Plastic DIP
LF347BN LF347N	Quad Quad		Plastic DIP Plastic DIP

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +15$ V, $V_{EE} = -15$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LF347B			LF347, LF351, LF353			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage ($R_S \leq 10$ k, $V_{CM} = 0$) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$	V_{IO}	— —	1.0 —	5.0 8.0	— —	5.0 —	10 13	mV
Avg. Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $R_S \leq 10$ k, $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	—	10	—	—	10	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current ($V_{CM} = 0$, Note 3) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$	I_{IO}	— —	25 —	100 4.0	— —	25 —	100 4.0	pA nA
Input Bias Current ($V_{CM} = 0$, Note 3) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$	I_{IB}	— —	50 —	200 8.0	— —	50 —	200 8.0	pA nA
Input Resistance	r_i	—	10^{12}	—	—	10^{12}	—	Ω
Common Mode Input Voltage Range	V_{ICR}	± 11	+15 –12	—	± 11	+15 –12	—	V
Large-Signal Voltage Gain ($V_O = \pm 10$ V, $R_L = 2.0$ k) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$	A_{VOL}	50 25	100 —	— —	25 15	100 —	— —	V/mV
Output Voltage Swing ($R_L = 10$ k)	V_O	± 12	± 14	—	± 12	± 14	—	V
Common Mode Rejection ($R_S \leq 10$ k)	CMR	80	100	—	70	100	—	dB
Supply Voltage Rejection ($R_S \leq 10$ k)	PSRR	80	100	—	70	100	—	dB
Supply Current LF347 LF351 LF353	I_D	— — —	7.2 — —	11 — —	— — —	7.2 1.8 3.6	11 3.4 6.5	mA
Short Circuit Current	I_{SC}	—	25	—	—	25	—	mA
Slew Rate ($A_V = +1$)	SR	—	13	—	—	13	—	V/ μs
Gain–Bandwidth Product	BWp	—	4.0	—	—	4.0	—	MHz
Equivalent Input Noise Voltage ($R_S = 100$ Ω , $f = 1000$ Hz)	e_n	—	24	—	—	24	—	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Equivalent Input Noise Current ($f = 1000$ Hz)	i_n	—	0.01	—	—	0.01	—	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Channel Separation (LF347, LF353) 1.0 Hz $\leq f \leq 20$ kHz (Input Referred)	—	—	–120	—	—	–120	—	dB

For Typical Characteristic Performance Curves, refer to MC34001, 34002, 34004 data sheet.

NOTE: 3. Input bias currents of JFET input op amps approximately double for every 10°C rise in junction temperature. To maintain junction temperatures as close to ambient as is possible, pulse techniques are utilized during test.



MOTOROLA

Micropower Voltage Reference Diodes

The LM285/LM385 series are micropower two-terminal bandgap voltage regulator diodes. Designed to operate over a wide current range of 10 μ A to 20 mA, these devices feature exceptionally low dynamic impedance, low noise and stable operation over time and temperature. Tight voltage tolerances are achieved by on-chip trimming. The large dynamic operating range enables these devices to be used in applications with widely varying supplies with excellent regulation. Extremely low operating current make these devices ideal for micropower circuitry like portable instrumentation, regulators and other analog circuitry where extended battery life is required.

The LM285/LM385 series are packaged in a low cost TO-226AA plastic case and are available in two voltage versions of 1.235 and 2.500 V as denoted by the device suffix (see Ordering Information table). The LM285 is specified over a -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$ temperature range while the LM385 is rated from 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$.

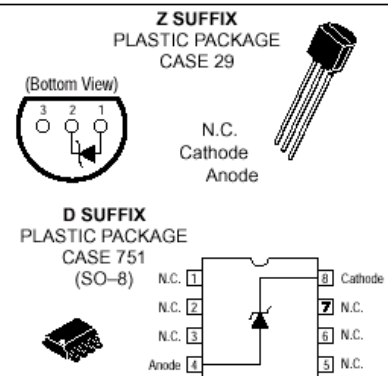
The LM385 is also available in a surface mount plastic package in voltages of 1.235 and 2.500 V.

- Operating Current from 10 μ A to 20 mA
- 1.0%, 1.5%, 2.0% and 3.0% Initial Tolerance Grades
- Low Temperature Coefficient
- 1.0 Ω Dynamic Impedance
- Surface Mount Package Available

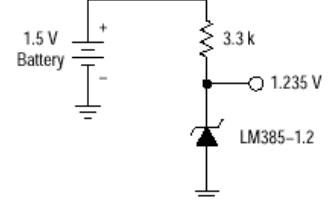
LM285 LM385, B

MICROPOWER VOLTAGE REFERENCE DIODES

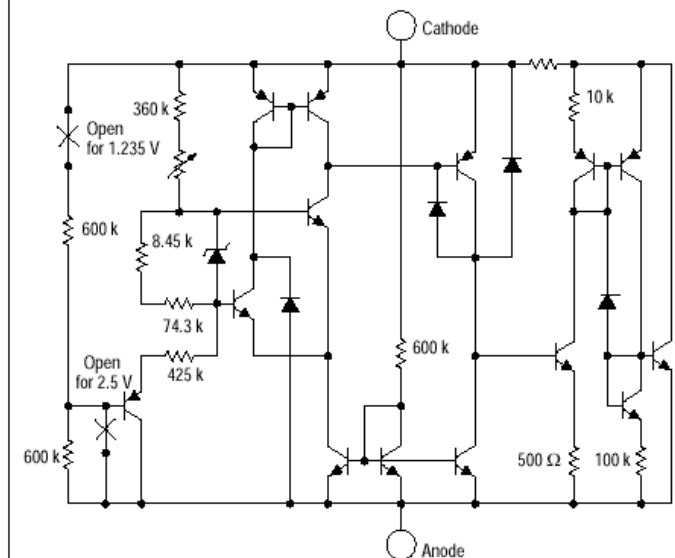
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



Standard Application



Representative Schematic Diagram



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Reverse Break-down Voltage	Tolerance
LM285D-1.2 LM285Z-1.2	$T_A = -40^{\circ}$ to $+85^{\circ}\text{C}$	1.235 V	$\pm 1.0\%$
LM285D-2.5 LM285Z-2.5		2.500 V	$\pm 1.5\%$
LM385BD-1.2 LM385BZ-1.2	$T_A = 0^{\circ}$ to $+70^{\circ}\text{C}$	1.235 V	$\pm 1.0\%$
LM385D-1.2 LM385Z-1.2		1.235 V	$\pm 2.0\%$
LM385BD-2.5 LM385BZ-2.5		2.500 V	$\pm 1.5\%$
LM385D-2.5 LM385Z-2.5		2.500 V	$\pm 3.0\%$

LM285 LM385, B

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Current	I_R	30	mA
Forward Current	I_F	10	mA
Operating Ambient Temperature Range LM285 LM385	T_A	- 40 to + 85 0 to +70	$^\circ\text{C}$
Operating Junction Temperature	T_J	+ 150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	- 65 to + 150	$^\circ\text{C}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	LM285-1.2			LM385-1.2/LM385B-1.2			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Reverse Breakdown Voltage ($I_{Rmin} \leq I_R \leq 20\text{ mA}$) LM285-1.2/LM385B-1.2 $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1) LM385-1.2 $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	$V_{(BR)R}$	1.223 1.200 — —	1.235 — — —	1.247 1.270 — —	1.223 1.210 1.205 1.192	1.235 — 1.235 —	1.247 1.260 1.260 1.273	V
Minimum Operating Current $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	I_{Rmin}	— —	8.0 —	10 20	— —	8.0 —	15 20	μA
Reverse Breakdown Voltage Change with Current $I_{Rmin} \leq I_R \leq 1.0\text{ mA}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1) 1.0 mA $\leq I_R \leq 20\text{ mA}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	$\Delta V_{(BR)R}$	— — — —	— — — —	1.0 1.5 10 20	— — — —	— — — —	1.0 1.5 20 25	mV
Reverse Dynamic Impedance $I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$	Z		0.6	—	—	0.6	—	W
Average Temperature Coefficient 10 $\mu\text{A} \leq I_R \leq 20\text{ mA}$, $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	$\Delta V_{(BR)}/\Delta T$	—	80	—	—	80	—	ppm/ $^\circ\text{C}$
Wideband Noise (RMS) $I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, 10 Hz $\leq f \leq 10\text{ kHz}$	n	—	60	—	—	60	—	μV
Long Term Stability $I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, $T_A = +25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$	S	—	20	—	—	20	—	ppm/ kHR

LM285 LM385, B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	LM285–2.5			LM385–2.5/LM385B–2.5			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Reverse Breakdown Voltage ($I_{Rmin} \leq I_R \leq 20\text{ mA}$) LM285–2.5/LM385B–2.5 $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1) LM385–2.5 $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	$V_{(BR)R}$	2.462 2.415 – –	2.5 – – –	2.538 2.585 – –	2.462 2.436 2.425 2.400	2.5 – 2.5 –	2.538 2.564 2.575 2.600	V
Minimum Operating Current $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	I_{Rmin}	– –	13 –	20 30	– –	13 –	20 30	μA
Reverse Breakdown Voltage Change with Current $I_{Rmin} \leq I_R \leq 1.0\text{ mA}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1) $1.0\text{ mA} \leq I_R \leq 20\text{ mA}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	$\Delta V_{(BR)R}$	– – – –	– – – –	1.0 1.5 10 20	– – – –	– – – –	2.0 2.5 20 25	mV
Reverse Dynamic Impedance $I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$	Z		0.6	–	–	0.6	–	W
Average Temperature Coefficient $20\text{ }\mu\text{A} \leq I_R \leq 20\text{ mA}$, $T_A = T_{low}$ to T_{high} (Note 1)	$\Delta V_{(BR)}/\Delta T$	–	80	–	–	80	–	ppm/ $^\circ\text{C}$
Wideband Noise (RMS) $I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, $10\text{ Hz} \leq f \leq 10\text{ kHz}$	n	–	120	–	–	120	–	μV
Long Term Stability $I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$, $T_A = +25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$	S	–	20	–	–	20	–	ppm/ kHR

NOTES: 1. $T_{low} = -40^\circ\text{C}$ for LM285–1.2, LM285–2.5

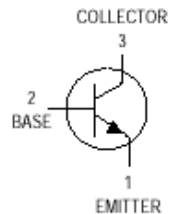
$= 0^\circ\text{C}$ for LM385–1.2, LM385B–1.2, LM385–2.5, LM385B–2.5

$T_{high} = +85^\circ\text{C}$ for LM285–1.2, LM285–2.5

$= +70^\circ\text{C}$ for LM385–1.2, LM385B–1.2, LM385–2.5, LM385B–2.5

Amplifier Transistors

NPN Silicon



MPS918*
MPS3563

*Motorola Preferred Device



CASE 29-04, STYLE 1
TO-92 (TO-226AA)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MPS918	MPS3563	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	15	12	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	30	30	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	3.0	2.0	Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	50		mA _{dc}
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	350 2.8		mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	0.85 6.8		Watts mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150		$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}^{(1)}$	357	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	147	$^\circ\text{C/W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS

Collector-Emitter Breakdown Voltage ⁽²⁾ ($I_C = 3.0 \text{ mA}_{dc}, I_B = 0$)	MPS918 MPS3563	$V_{(BR)CEO}$	15 12	— —	Vdc
Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 1.0 \text{ mA}_{dc}, I_E = 0$) ($I_C = 100 \text{ mA}_{dc}, I_E = 0$)	MPS918 MPS3563	$V_{(BR)CBO}$	30 30	— —	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = 10 \text{ mA}_{dc}, I_C = 0$)	MPS918 MPS3563	$V_{(BR)EBO}$	3.0 2.0	— —	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CB} = 15 \text{ Vdc}, I_E = 0$)	MPS918 MPS3563	I_{CBO}	— —	10 50	nA _{dc}

1. $R_{\theta JA}$ is measured with the device soldered into a typical printed circuit board.

2. Pulse Test: Pulse Width = 300 μs ; Duty Cycle = 1.0%.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	------

ON CHARACTERISTICS

DC Current Gain ⁽²⁾ ($I_C = 3.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 1.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 8.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$)	MPS918 MPS3563	h_{FE}	20 20	— 200	—
Collector–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 1.0\text{ mA}$)	MPS918	$V_{CE(sat)}$	—	0.4	Vdc
Base–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 1.0\text{ mA}$)	MPS918	$V_{BE(sat)}$	—	1.0	Vdc

SMALL–SIGNAL CHARACTERISTICS

Current–Gain — Bandwidth Product ⁽²⁾ ($I_C = 4.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 100\text{ MHz}$) ($I_C = 8.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 100\text{ MHz}$)	MPS918 MPS3563	f_T	600 600	— 1500	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 0\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$) ($V_{CB} = 10\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$) ($V_{CB} = 10\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	MPS918 MPS918 MPS3563	C_{obo}	— — —	3.0 1.7 1.7	pF
Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5\text{ Vdc}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	MPS918	C_{ibo}	—	2.0	pF
Small–Signal Current Gain ($I_C = 8.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	MPS3563	h_{fe}	20	250	—
Noise Figure ($I_C = 1.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 6.0\text{ Vdc}$, $R_S = 400\text{ k}\Omega$, $f = 60\text{ MHz}$)	MPS918	NF	—	6.0	dB

FUNCTIONAL TEST

Common–Emitter Amplifier Power Gain ($I_C = 6.0\text{ mA}$, $V_{CB} = 12\text{ Vdc}$, $f = 200\text{ MHz}$) ($I_C = 8.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 200\text{ MHz}$) ($G_{fd} + G_{re} \leq -20\text{ dB}$)	MPS918 MPS3563	G_{pe}	15 14	— —	dB
Power Output ($I_C = 8.0\text{ mA}$, $V_{CB} = 15\text{ Vdc}$, $f = 500\text{ MHz}$)	MPS918	P_{out}	30	—	mW
Oscillator Collector Efficiency ($I_C = 8.0\text{ mA}$, $V_{CB} = 15\text{ Vdc}$, $P_{out} = 30\text{ mW}$, $f = 500\text{ MHz}$)	MPS918	η	25	—	%

2. Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; Duty Cycle $\leq 1.0\%$.

Complementary Silicon Plastic Power Transistors

... designed for use in general purpose amplifier and switching applications.

- Collector-Emitter Saturation Voltage —
 $V_{CE(sat)} = 1.5 \text{ Vdc (Max) @ } I_C = 6.0 \text{ Adc}$
- Collector-Emitter Sustaining Voltage —
 $V_{CEO(sus)} = 60 \text{ Vdc (Min) — TIP41A, TIP42A}$
 $= 80 \text{ Vdc (Min) — TIP41B, TIP42B}$
 $= 100 \text{ Vdc (Min) — TIP41C, TIP42C}$
- High Current Gain — Bandwidth Product
 $f_T = 3.0 \text{ MHz (Min) @ } I_C = 500 \text{ mAdc}$
- Compact TO-220 AB Package

*MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	TIP41A TIP42A	TIP41B TIP42B	TIP41C TIP42C	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	80	100	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CB}	60	80	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	5.0			Vdc
Collector Current — Continuous Peak	I_C	6 10			Adc
Base Current	I_B	2.0			Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	65 0.52			Watts W/°C
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	2.0 0.016			Watts W/°C
Unclamped Inductive Load Energy (1)	E	62.5			mJ
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +150			°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	62.5	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.92	°C/W

(1) $I_C = 2.5 \text{ A}$, $L = 20 \text{ mH}$, P.R.F. = 10 Hz, $V_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_{BE} = 100 \Omega$.

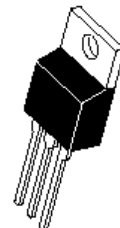
Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

REV 1

NPN
TIP41A
TIP41B*
TIP41C*
PNP
TIP42A
TIP42B*
TIP42C*

*Motorola Preferred Device

6 AMPERE
POWER TRANSISTORS
COMPLEMENTARY
SILICON
60-80-100 VOLTS
65 WATTS



CASE 221A-06
TO-220AB

TIP41A TIP41B TIP41C TIP42A TIP42B TIP42C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_C = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Collector-Emitter Sustaining Voltage (1) (I _C = 30 mAdc, I _B = 0)	TIP41A, TIP42A TIP41B, TIP42B TIP41C, TIP42C V _{CEO(sus)}	60 80 100	— — —	Vdc
Collector Cutoff Current (V _{CE} = 30 Vdc, I _B = 0) (V _{CE} = 60 Vdc, I _B = 0)	TIP41A, TIP42A TIP41B, TIP41C TIP42B, TIP42C I _{CEO}	— — —	0.7 0.7 0.7	mAdc
Collector Cutoff Current (V _{CE} = 60 Vdc, V _{EB} = 0) (V _{CE} = 80 Vdc, V _{EB} = 0) (V _{CE} = 100 Vdc, V _{EB} = 0)	TIP41A, TIP42A TIP41B, TIP42B TIP41C, TIP42C I _{CES}	— — —	400 400 400	μAdc
Emitter Cutoff Current (V _{BE} = 5.0 Vdc, I _C = 0)	I _{EBO}	—	1.0	mAdc
ON CHARACTERISTICS (1)				
DC Current Gain (I _C = 0.3 Adc, V _{CE} = 4.0 Vdc) (I _C = 3.0 Adc, V _{CE} = 4.0 Vdc)	h _{FE}	30 15	— 75	—
Collector-Emitter Saturation Voltage (I _C = 6.0 Adc, I _B = 600 mAdc)	V _{CE(sat)}	—	1.5	Vdc
Base-Emitter On Voltage (I _C = 6.0 Adc, V _{CE} = 4.0 Vdc)	V _{BE(on)}	—	2.0	Vdc
DYNAMIC CHARACTERISTICS				
Current-Gain — Bandwidth Product (I _C = 500 mAdc, V _{CE} = 10 Vdc, f _{test} = 1.0 MHz)	f _T	3.0	—	MHz
Small-Signal Current Gain (I _C = 0.5 Adc, V _{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	h _{fe}	20	—	—

(1) Pulse Test: Pulse Width ≤ 300 μs, Duty Cycle ≤ 2.0%.

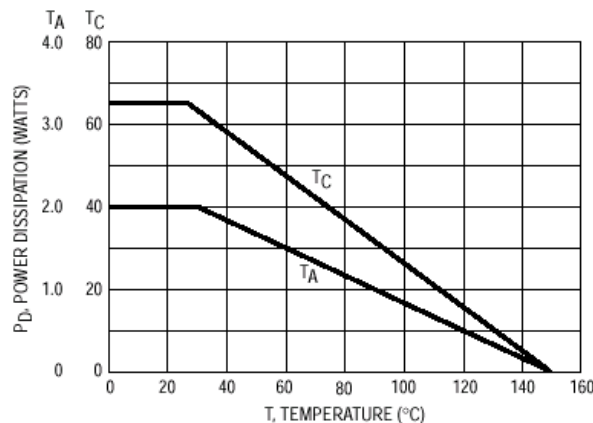


Figure 1. Power Derating

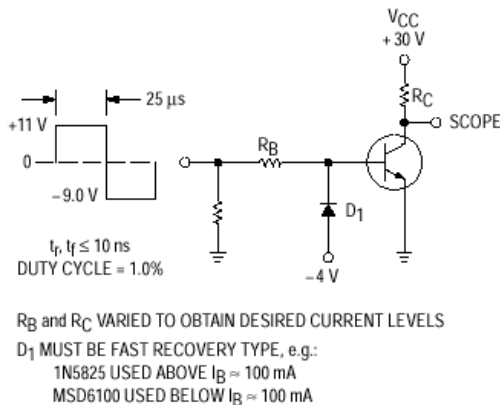


Figure 2. Switching Time Test Circuit

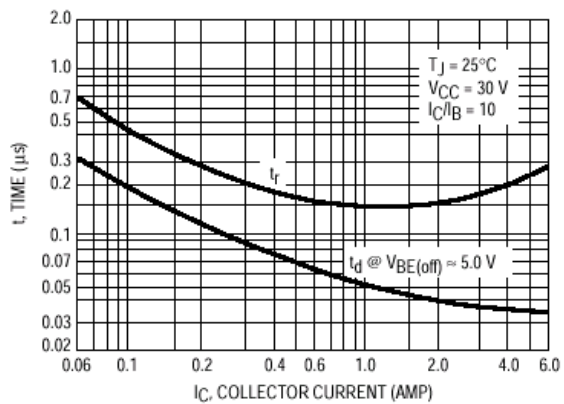


Figure 3. Turn-On Time

Triacs

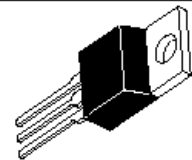
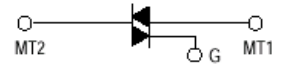
Silicon Bidirectional Thyristors

... designed primarily for full-wave ac control applications such as lighting systems, heater controls, motor controls and power supplies; or wherever full-wave silicon-gate-controlled devices are needed.

- Off-State Voltages to 800 Volts
- All Diffused and Glass Passivated Junctions for Parameter Uniformity and Stability
- Small, Rugged, Thermowatt Construction for Thermal Resistance and High Heat Dissipation
- Gate Triggering Guaranteed in Three Modes (MAC223 Series) or Four Modes (MAC223A Series)

MAC223 Series MAC223A Series

TRIACs
25 AMPERES RMS
200 thru 800 VOLTS



**CASE 221A-04
(TO-220AB)
STYLE 4**

MAXIMUM RATINGS ($T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Peak Repetitive Off-State Voltage ($T_J = -40$ to 125°C)(1) (1/2 Sine Wave 50 to 60 Hz, Gate Open)	V_{DRM}	200 400 600 800	Volts
On-State RMS Current ($T_C = 80^\circ\text{C}$) (Full Cycle Sine Wave 50 to 60 Hz)	$I_{\text{T(RMS)}}$	25	Amps
Peak Non-repetitive Surge Current (One Full Cycle, 60 Hz, $T_C = 80^\circ\text{C}$, preceded and followed by rated current)	I_{TSM}	250	Amps
Circuit Fusing ($t = 8.3$ ms)	I^2t	260	A^2s
Peak Gate Current ($t \leq 2$ μs)	I_{GM}	2	Amps
Peak Gate Voltage ($t \leq 2$ μs)	V_{GM}	± 10	Volts
Peak Gate Power ($t \leq 2$ μs)	P_{GM}	20	Watts
Average Gate Power ($T_C = 80^\circ\text{C}$, $t \leq 8.3$ ms)	$P_{\text{G(AV)}}$	0.5	Watts
Operating Junction Temperature Range	T_J	-40 to 125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to 150	$^\circ\text{C}$
Mounting Torque	—	8	in. lb.

1. V_{DRM} for all types can be applied on a continuous basis. Blocking voltages shall not be tested with a constant current source such that the voltage ratings of the devices are exceeded.

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.2	$^{\circ}\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	60	$^{\circ}\text{C/W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^{\circ}\text{C}$ and either polarity of MT2 to MT1 voltage unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Peak Blocking Current ⁽¹⁾ ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$) $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ $T_J = 125^{\circ}\text{C}$	I_{DRM}	— —	— —	10 2	μA mA
Peak On-State Voltage ($I_{TM} = 35 \text{ A Peak}$, Pulse Width = 2 ms, Duty Cycle = 2%)	V_{TM}	—	1.4	1.85	Volts
Gate Trigger Current (Continuous dc) ($V_D = 12 \text{ V}$, $R_L = 100 \Omega$) MT2(+), G(+); MT2(-), G(-); MT(+), G(-) MT2(-), G(+)*A* SUFFIX ONLY	I_{GT}	— —	20 30	50 75	mA
Gate Trigger Voltage (Continuous dc) ($V_D = 12 \text{ V}$, $R_L = 100 \Omega$) MT2(+), G(+); MT2(-), G(-); MT(+), G(-) MT2(-), G(+)*A* SUFFIX ONLY ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$, $T_J = 125^{\circ}\text{C}$, $R_L = 10 \text{ k}$) MT(+), G(+); MT2(-), G(-); MT2(+), G(-) MT2(-), G(+)*A* SUFFIX ONLY	V_{GT}	— — 0.2 0.2	1.1 1.3 0.4 0.4	2 2.5 — —	Volts
Holding Current ($V_D = 12 \text{ V}$, $I_{TM} = 200 \text{ mA}$, Gate Open)	I_H	—	10	50	mA
Gate Controlled Turn-On Time ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$, $I_{TM} = 35 \text{ A Peak}$, $I_G = 200 \text{ mA}$)	t_{gt}	—	1.5	—	μs
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$, Exponential Waveform, $T_C = 125^{\circ}\text{C}$)	dv/dt	—	40	—	$\text{V}/\mu\text{s}$
Critical Rate of Rise of Commutation Voltage ($V_D = \text{Rated } V_{DRM}$, $I_{TM} = 35 \text{ A Peak}$, Commutating $di/dt = 12.6 \text{ A/ms}$, Gate Unenergized, $T_C = 80^{\circ}\text{C}$)	$dv/dt(c)$	—	5	—	$\text{V}/\mu\text{s}$

1. Ratings apply for open gate conditions. Devices shall not be tested with a constant current source for blocking voltage such that the voltage applied exceeds the rated blocking voltage.

FIGURE 1 – RMS CURRENT DERATING

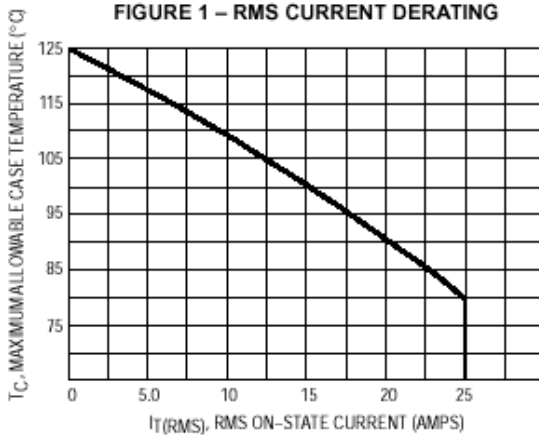
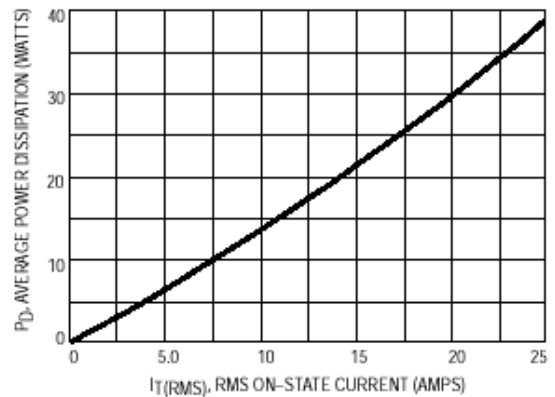


FIGURE 2 – ON-STATE POWER DISSIPATION



LM556/NE556

Dual Timer

Features

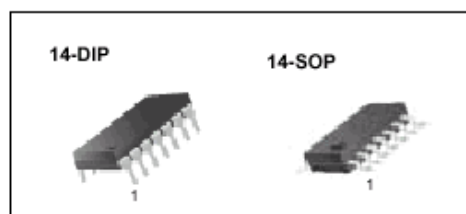
- Replaces Two LM555/NE555 Timers
- Operates in Both Astable And Monostable Modes
- High Output Current
- TTL Compatible
- Timing From Microsecond To Hours
- Adjustable Duty Cycle
- Temperature Stability Of 0.005% Per °C

Applications

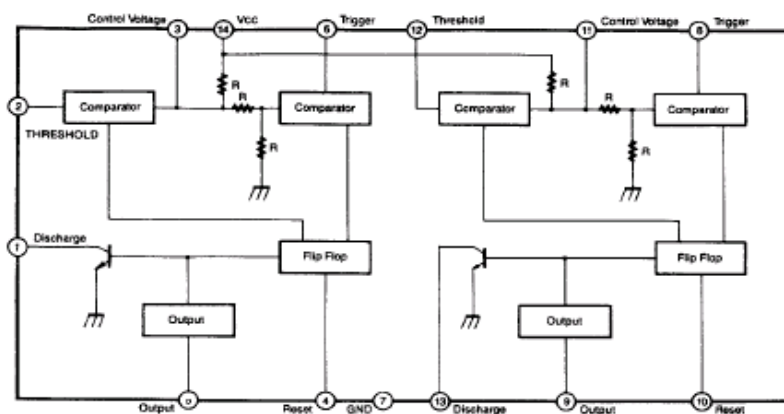
- Precision Timing
- Pulse Shaping
- Pulse Width Modulation
- Frequency Division
- Traffic Light Control
- Sequential Timing
- Pulse Generator
- Time Delay Generator
- Touch Tone Encoder
- Tone Burst Generator

Description

The LM556/NE556 series dual monolithic timing circuits are a highly stable controller capable of producing accurate time delays or oscillation. The LM556/NE556 is a dual LM555. Timing is provided an external resistor and capacitor for each timing function. The two timers operate independently of each other, sharing only V_{CC} and ground. The circuits may be triggered and reset on falling waveforms. The output structures may sink or source 200mA.



Internal Block Diagram



Electrical Characteristics

(TA = 25°C, VCC = 5 ~ 15V, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage	VCC	-	4.5	-	16	V
Supply Current *1(two timers) (low state)	ICC	VCC = 5V, RL = ∞ VCC = 15V, RL = ∞	-	5 16	12 30	mA mA
Timing Error *2(monostable) Initial Accuracy Drift with Temperature Drift with Supply Voltage	ACCUR Δt/ΔT Δt/ΔVCC	RA = 2KΩ to 100KΩ C = 0.1μF T = 1.1RC	-	0.75 50 0.1	-	% ppm/°C %/V
Control Voltage	VC	VCC = 15V	9.0	10.0	11.0	V
		VCC = 5V	2.6	3.33	4.0	V
Threshold Voltage	VTH	VCC = 15V	8.8	10.0	11.2	V
		VCC = 5V	2.4	3.33	4.2	V
Threshold Current*3	ITH	-	-	30	250	nA
Trigger Voltage	VTR	VCC = 15V	4.5	5.0	5.6	V
		VCC = 5V	1.1	1.6	2.2	V
Trigger Current	ITR	VTR = 0V	-	0.01	2.0	μA
Reset Voltage*5	VRST	-	0.4	0.6	1.0	V
Reset Current	IRST	-	-	0.03	0.6	mA
Low Output Voltage	VOL	VCC = 15V ISINK = 10mA ISINK = 50mA ISINK = 100mA ISINK = 200mA	-	0.1 0.4 2.0 2.5	0.25 0.75 3.2	V
		VCC = 5V ISINK = 8mA ISINK = 5mA		0.25 0.15	0.35 0.25	V
High Output Voltage	VOH	VCC = 15V ISOURCE = 200mA ISOURCE = 100mA	12.75	12.5 13.3	-	V
		VCC = 5V ISOURCE = 100mA	2.75	3.3	-	V
Rise Time of Output	tR	-	-	100	300	ns
Fall Time of Output	tF	-	-	100	300	ns
Discharge Leakage Current	ILKG	-	-	10	100	nA
Matching Characteristics*4 Initial Accuracy Drift with Temperature Drift with Supply Voltage	ACCUR Δt/ΔT Δt/ΔVCC	-	-	1.0 10 0.2	2.0 0.5	% ppm/°C %/V
Timing Error (astable)*2 Initial Accuracy Drift with Temperature Drift with Supply Voltage	ACCUR Δt/ΔT Δt/ΔVcc	VCC = 15V RA, RB = 1KΩ to 100KΩ C = 0.1μF	-	2.25 150 0.3	-	% ppm/°C %/V

Notes:

*1. Supply current when output is high is typically 1.0mA less at VCC = 5V

*2. Tested at VCC = 5V and VCC = 15V

*3. This will determine the maximum value of RA + RB for 15V operation.
The maximum total R = 20MΩ, and for 5V operation the maximum total R = 6.6MΩ.

*4. Matching characteristics refer to the difference between performance characteristics of each timer section in the monostable mode.

*5. As reset voltage lowers, timing is inhibited and then the output goes low.



PIC18FXX2

28/40-pin High Performance, Enhanced FLASH Microcontrollers with 10-Bit A/D

High Performance RISC CPU:

- C compiler optimized architecture/instruction set
 - Source code compatible with the PIC16 and PIC17 instruction sets
- Linear program memory addressing to 32 Kbytes
- Linear data memory addressing to 1.5 Kbytes

Device	On-Chip Program Memory		On-Chip RAM (bytes)	Data EEPROM (bytes)
	FLASH (bytes)	# Single Word Instructions		
PIC18F242	16K	8192	768	256
PIC18F252	32K	16384	1536	256
PIC18F442	16K	8192	768	256
PIC18F452	32K	16384	1536	256

- Up to 10 MIPS operation:
 - DC - 40 MHz osc./clock input
 - 4 MHz - 10 MHz osc./clock input with PLL active
- 16-bit wide instructions, 8-bit wide data path
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier

Peripheral Features:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupt pins
- Timer0 module: 8-bit/16-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1 module: 16-bit timer/counter
- Timer2 module: 8-bit timer/counter with 8-bit period register (time-base for PWM)
- Timer3 module: 16-bit timer/counter
- Secondary oscillator clock option - Timer1/Timer3
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules. CCP pins that can be configured as:
 - Capture input: capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns ($T_{CY}/16$)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns (T_{CY})
 - PWM output: PWM resolution is 1- to 10-bit, max. PWM freq. @: 8-bit resolution = 156 kHz, 10-bit resolution = 39 kHz
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module, Two modes of operation:
 - 3-wire SPI™ (supports all 4 SPI modes)
 - I²C™ Master and Slave mode

Peripheral Features (Continued):

- Addressable USART module:
 - Supports RS-485 and RS-232
- Parallel Slave Port (PSP) module

Analog Features:

- Compatible 10-bit Analog-to-Digital Converter module (A/D) with:
 - Fast sampling rate
 - Conversion available during SLEEP
 - Linearity ≤ 1 LSB
- Programmable Low Voltage Detection (PLVD)
 - Supports interrupt on-Low Voltage Detection
- Programmable Brown-out Reset (BOR)

Special Microcontroller Features:

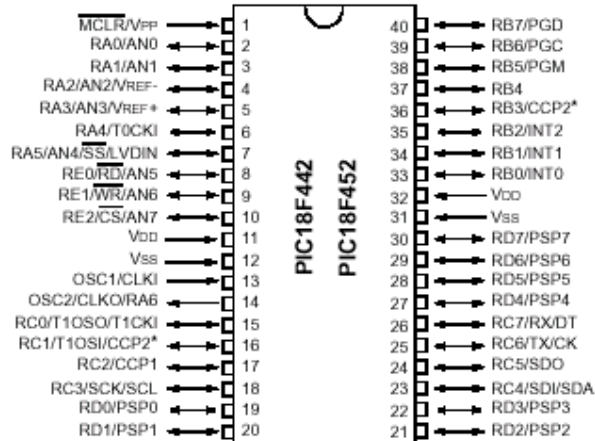
- 100,000 erase/write cycle Enhanced FLASH program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory
- FLASH/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own On-Chip RC Oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options including:
 - 4X Phase Lock Loop (of primary oscillator)
 - Secondary Oscillator (32 kHz) clock input
- Single supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

CMOS Technology:

- Low power, high speed FLASH/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption:
 - < 1.6 mA typical @ 5V, 4 MHz
 - 25 μ A typical @ 3V, 32 kHz
 - < 0.2 μ A typical standby current

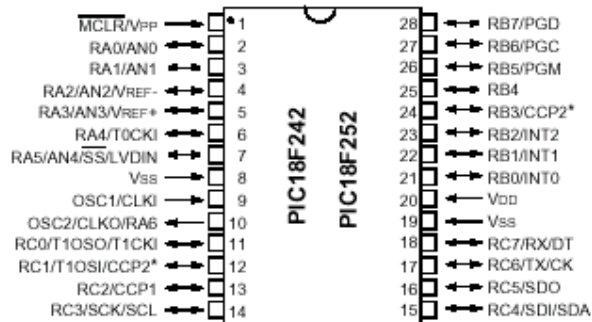
Pin Diagrams (Cont.'d)

DIP



Note: Pin compatible with 40-pin PIC16C7X devices.

DIP, SOIC



* RB3 is the alternate pin for the CCP2 pin multiplexing.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ying Hao, Fuzzy Control and Modeling, IEEE Press Series on Biomedical Engineering, 2000.
- [2] Jamshidi Mohammad, Fuzzy Logic and Control, Prentice Hall, 1993.
- [3] Gorski D. P. y Tavans P.V., Lógica, Tratados y Manuales Grijalbo.
- [4] Suppes Patrick, Introducción a la Lógica Matemática, Reverté S. A. 1980.
- [5] Peatman John B, Design with PIC Microcontrolers, Prentice Hall, 1998.
- [6] Mccomb Gordon, The Robot Builder's Bonanza: 99 Inexpensive Robotics Projects, McGraw-Hill, 1987.
- [7] Coughlin Robert F., Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, Prentice Hall, quinta edición, 1999.
- [8] Ogata Katsuhiko, Dinámica de Sistemas, Prentice Hall, 1ª edición, 1987.
- [9] Ogata Katsuhiko, Ingeniería de Control Moderna, Prentice Hall, 2ª edición, 1993.
- [10] Gayakwad Remakant, Analog and Digital Control Systems, Prentice Hall, 1988.
- [11] Creus Antonio, Instrumentación Industrial, Alfaomega, 5ª edición, 1995.
- [12] Considine M. Douglas, Process/ Industrial Instruments and Controls Handbook, McGraw-Hill, 4ª edición, 1993.
- [13] Knight Andrew, Basics of MATLAB and Beyond, Chapman & Hall/CRC, 1999.
- [14] Ehrich Leonard, Using MATLAB to Analyze and Design Control Systems, Naomi, Benjamin/Cummings, 2ª edición, 1995.
- [15] Motorola Thiristor Data TRIACS & SCRs.
- [16] Motorola Bipolar Power Transistor Data.
- [17] Motorola Semiconductor Master Selection Guide.
- [18] Motorola Small Signal Transistors, FETs and Diodes Device Data.
- [19] Manual del PIC18F452.

- [20] Manual de MPLAB, www.microchip.com
- [21] ICPROG A, www.icporog.com
- [22] Programador para Microcontrolador PIC18F452.
- [23] Programa de Simulación y Diseño de Circuitos Impresos PROTEL 99 SE.
- [24] Programa MATLAB 6.5.