

**DESCRIPCION GENERAL DE LAS TECNICAS DE CONTROL BORROSO Y  
APLICACIÓN EN EL CONTROL DE NIVEL Y FLUJO.**

**SERGIO ANDRES JAIMES RUEDA.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.  
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION.  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA.  
FLORIDABLANCA.**

**2010.**

**DESCRIPCION GENERAL DE LAS TECNICAS DE CONTROL BORROSO Y  
APLICACIÓN EN EL CONTROL DE NIVEL Y FLUJO.**

**SERGIO ANDRES JAIMES RUEDA.**

**Trabajo de Grado para obtener el título de  
Ingeniero Electrónico.**

**Director**

**EDGAR BARRIOS URUEÑA.**

**Ing. MSc. Eléctrico.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.  
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION.  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA.  
FLORIDABLANCA.**

**2010.**

Nota de Aceptación

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Floridablanca, Noviembre 26 de 2010.

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco al Ingeniero **Edgar Barrios Urueña**, Director del proyecto, por su orientación y porque me dio la libertad y confianza necesaria para la realización del proyecto.

Agradezco a los Doctores **Omar Pinzón** y **Héctor Pérez**, por la orientación y por las valiosas aclaraciones y correcciones a la hora de presentar esta tesis de grado.

Agradezco al Ingeniero **Jaime Zarate**, por su valioso aporte y orientación en la realización de esta tesis de grado.

Esta tesis está dedicada a mis Padres, **Antonio Jaimes** y **Yolanda Rueda**, a quienes agradezco de todo corazón por su amor, cariño, comprensión, paciencia y sobre todo, por la estabilidad económica que me brindaron. En todo momento los llevo conmigo.

Agradezco a mi hermana **Ayda Juliana Jaimes**, y a mi abuela **Edelmira Jimenez**, por la compañía y el apoyo que me brindan. Sé que cuento con ellas siempre.

Agradezco a **Dios** y a la **Virgen**, por haber llenado mi vida de dicha, bendición, sabiduría y paciencia, por iluminarme en cada paso, por sentir su presencia a mi lado, por estar siempre a mi lado en los momentos en que desfallecí.

## INDICE DE CONTENIDO.

	Pág.
<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.1 Objetivo General.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Introducción a la lógica difusa: breve historia y aplicaciones.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Conjuntos difusos y funciones características.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Diagrama de bloques de un sistema basado en técnicas de lógica difusa.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.1 Mecanismos de inferencia.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.1.1 Agregación lógica.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Identificación de la estructura de un modelo borroso del tipo TAKAGI-SUGENO.....</b>	<b>26</b>
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Porque en un sistema de control de nivel.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Análisis del control de la servo válvula.....</b>	<b>31</b>

<b>3.3</b>	<i>Módulo Feedback de nivel y flujo PROCON 38-001.....</i>	<b>32</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Características.....</i>	<b>33</b>
<b>3.3.2</b>	<i>Principales elementos del módulo.....</i>	<b>33</b>
<b>3.3.3</b>	<i>Descripción del equipo.....</i>	<b>34</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<i>Modelado matemático del módulo de nivel.....</i>	<b>35</b>
<b>4.1.1</b>	<i>Modelo matemático de depósito del tanque.....</i>	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<i>Modelo matemático de depósito de tanques acoplados.....</i>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<i>Descripción del método del tipo TAKAGI-SUGENO.....</i>	<b>39</b>
<b>4.3.1</b>	<i>Modelo empleado.....</i>	<b>39</b>
<b>4.3.2</b>	<i>Justificación del método.....</i>	<b>40</b>
<b>4.3.3</b>	<i>Aplicación del método de identificación.....</i>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<i>Diseño y construcción del adaptador de señal.....</i>	<b>45</b>
<b>4.4.1</b>	<i>Resultados obtenidos mediante la implementación del adaptador de señal.....</i>	<b>49</b>
<b>4.4.2</b>	<i>Indicaciones para el manejo del adaptador de señal.....</i>	<b>51</b>
<b>4.5</b>	<i>Diagrama de bloques del sistema.....</i>	<b>52</b>
<b>4.6</b>	<i>Diagrama de flujo del sistema.....</i>	<b>54</b>
<b>5.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>57</b>

## INDICE DE FIGURAS.

	Pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Lógica Clásica VS Lógica Difusa.....</i>	20
<b>Figura 2.</b> <i>Diagrama de bloques de un sistema basado en técnicas de Lógica Difusa.....</i>	22
<b>Figura 3.</b> <i>Módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001.....</i>	32
<b>Figura 4.</b> <i>Circuito de agua del Módulo de Nivel y Flujo.....</i>	35
<b>Figura 5.</b> <i>Depósitos de Tanque Acoplados.....</i>	38
<b>Figura 6.</b> <i>Función de membrecía para el rango pequeño, Medio Positivo y Largo Positivo.....</i>	46
<b>Figura 7.</b> <i>Funcionamiento de un sistema difuso del tipo Takagi Sugeno....</i>	48
<b>Figura 8.</b> <i>Corriente VS Flujo.....</i>	50
<b>Figura 9.</b> <i>Diseño de la tarjeta del Adaptador de señal.....</i>	50
<b>Figura 10.</b> <i>Indicaciones para el manejo del controlador.....</i>	51
<b>Figura 11.</b> <i>Diagrama de Bloques del sistema.....</i>	52

## INDICE DE TABLAS.

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Resultados obtenidos mediante la implementación del adaptador de señal.....	49



## INDICE DE ANEXO.

	Pág.
<b>Anexo 1.</b> <i>Hoja de datos de la Servo válvula LM24-SR.....</i>	59

## **RESUMEN GENERAL TRABAJO DE GRADO.**

**TITULO:** DESCRIPCION GENERAL DE LAS TECNICAS DE CONTROL BORROSO Y APLICACIÓN EN EL CONTROL DE NIVEL Y FLUJO.

**AUTOR:** SERGIO ANDRES JAIMES RUEDA

**FACULTAD:** INGENIERIA ELECTRONICA.

**DIRECTOR:** MSc. EDGAR BARRIOS URUEÑA.

### **RESUMEN.**

Esta Tesis de Grado, trata sobre modelado de sistemas utilizando la lógica difusa para determinar el control de nivel de un tanque. Además se diseñó y construyó un circuito digital que permite realizar lógica difusa en la servo válvula del módulo de nivel y flujo del Laboratorio de Control.

## **GENERAL SUMMARY WORK OF DEGREE.**

**TITLE:** GENERAL DESCRIPTION THE TECHNOLOGIES OF FUZZY CONTROL AND APPLICATION IN THE CONTROL OF LEVEL AND FLOW.

**AUTHOR:** SERGIO ANDRES JAIMES RUEDA

**AUTHORIZE:** ELECTRONIC ENGINEERING.

**DIRECTOR:** MSc. EDGAR NEIGHBORHOODS URUEÑA.

### **SUMMARY.**

This thesis, deals with system modeling using fuzzy logic to determine the level control of a tank. You designed and built a digital circuit that allows fuzzy logic in the servo valve and flow-level module of the Laboratory of Control.

## 1. INTRODUCCION.

En la ingeniería de control el modelado y la identificación son pasos previos fundamentales para el diseño de sistemas de control, supervisión y detección de fallos. Existen técnicas de modelado de sistemas de control aplicables a muchos sistemas, sin embargo, existen sistemas en los que no es posible aplicar esas técnicas debido a la falta de un conocimiento preciso y formal del sistema, a un comportamiento altamente no lineal del sistema, al alto grado de incertidumbre en los datos o a características cambiantes.

Dadas estos casos en el área de control en esta tesis de grado se realizó la identificación de los parámetros del modelado matemático del módulo de nivel y flujo del Laboratorio de Control de la UPB. Para hallar el modelo se utilizaron las técnicas de identificación de lógica difusa propuestas por Takagi-Sugeno.

Para aplicar el control de lógica difusa del modelo obtenido se diseñó y construyó un adaptador de señal con salida de 4 a 20 mA.

El Informe de este trabajo consta de seis (7) capítulos. En el primer capítulo se presentan las generalidades del trabajo realizado y objetivos de la tesis de grado. En el segundo capítulo se describe los aspectos teóricos fundamentales del control de lógica difusa y del método de identificación (TAKAGI – SUGENO). En el tercer capítulo se describe detalladamente los materiales y métodos utilizados en el desarrollo de la tesis de grado. En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos del modelo. En el quinto capítulo se plantean las recomendaciones. En el sexto capítulo se presentan las conclusiones de la tesis de grado y finalmente en el séptimo capítulo de plantean la lista de publicaciones consultadas.

## **1.1 OBJETIVOS.**

### **1.1.1 Objetivo General.**

Descripción general de las técnicas de lógica difusa y aplicación en el control de nivel y flujo.

### **1.1.2 Objetivos Específicos.**

- Realizar un estudio teórico y práctico sobre el uso de las técnicas de lógica difusa en dispositivos electrónicos.
- Realizar un modelo matemático utilizando la lógica difusa propuestas por Takagi-Sugeno, para determinar el control de nivel de un tanque.
- Diseñar y construir un circuito digital que permita realizar lógica difusa en la servo válvula del módulo de nivel y flujo del Laboratorio de Control.

## 2. MARCO TEORICO.

### 2.1 INTRODUCCION A LA LOGICA DIFUSA: BREVE HISTORIA Y APLICACIONES.

Últimamente se ha puesto mayor interés a la teoría e implementación de Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*), principalmente en aplicaciones industriales y en diseño de sistemas de control.

Existen numerosas razones por el control difuso, teniendo en cuenta que es una estrategia NO LINEAL, y que además se puede combinar con otras estrategias de control. (Redes neuronales, control adaptativo, control experto, entre otros).

Una es que las características de funcionamiento de los procesos reales consiste en que son no lineales, la dinámica cambia con las variaciones del punto de operación y hay otras no linealidades en el proceso.

Otra, consiste en que el control difuso ofrece una mejor interface al usuario para llevar las características reales (y no lineales de los procesos) a las expresiones (funciones o expresiones gramaticales) no lineales del controlador.

Adicionalmente, ofrece la posibilidad de realizar el diseño del controlador de dos formas:

1. Empleando la experiencia y la terminología de quienes manejan los procesos (ingenieros, técnicos, operarios) por medio de un razonamiento y un conjunto de reglas basadas en unas condiciones similares y muy cercanas a las reales, es decir, un sistema experto en tiempo real.
2. Otra forma consiste en diseñar como un sistema de control no lineal, teniendo en cuenta que cualquier función no lineal continua puede ser representada, tan exacto como se quiera, por un conjunto finito de variables, valores y reglas difusas.

El control difuso es una clase de los sistemas basados en conocimiento: KBS (del inglés Knowledge Based System). Una definición muy general para un sistema KBS es:

Un control KBS para lazo cerrado es un sistema de control que incrementa la funcionalidad, la confiabilidad y la robustez del control incorporando conocimiento que no puede ser incluido en el modelo analítico en el que se basa el diseño del algoritmo de control, conocimiento que es usualmente considerado por modos manuales de operación o por otros mecanismos lógico auxiliares. (por ejemplo, métodos basados en conocimientos empíricos de los operadores de los sistemas de control).

Una de las disciplinas matemáticas con mayor número de seguidores actualmente es la llamada lógica difusa o borrosa, que es la lógica que utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total. Conviene recalcar que lo que es difuso, borroso, impreciso o vago no es la lógica en sí, sino el objeto que se estudia: expresa la falta de definición del concepto al que se aplica. La lógica difusa permite tratar información imprecisa como estatura media o temperatura baja, en términos de conjuntos borrosos que se combinan en reglas para definir acciones: si la temperatura es alta entonces se debe enfriar mucho. De esta manera, los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada, definidas en términos de conjuntos difusos, por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

La lógica difusa fue investigada, por primera vez, a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley (California) por el ingeniero Lofty A. Zadeh, cuando se dio cuenta de lo que él llamo principio de incompatibilidad. En ese momento introdujo el concepto de conjunto difuso (Fuzzy Set), bajo el que reside la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas. La lógica difusa permite representar el

conocimiento común, que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. Permite trabajar a la vez con datos numéricos y términos lingüísticos; los términos lingüísticos son inherentemente menos precisos que los datos numéricos pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

El aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que, a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales del razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Se puede decir que si la lógica es la ciencia de los principios formales y normativos del razonamiento, la lógica difusa o borrosa se refiere a los principios formales del razonamiento aproximado, considerando el razonamiento preciso (lógica clásica) como caso límite. Así pues, las características principales de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no – lineales, y su base en el lenguaje natural.

Aunque la lógica difusa es conocida con este nombre desde que Zadeh la bautizó así en 1965 (*lógica difusa*), la idea que se esconde tras ella y sus orígenes se remontan 2500 años atrás; los filósofos griegos, Aristóteles entre ellos, consideraban que existían ciertos grados de veracidad y de falsedad. Platón ya plantó los fundamentos de lo que hoy se conoce como *lógica difusa*, indicando que había una tercera región entre verdadero y falso: los grados de pertenencia.

El término borroso aplicado a la lógica y a la teoría de conjuntos y sistemas procede de la expresión fuzzy sets (conjuntos borrosos) acuñada por Lofti A. Zadeh, brillante ingeniero eléctrico iraní nacionalizado en Estados Unidos, profesor de las más prestigiosas universidades norteamericanas y doctor honoris causa de varias instituciones académicas. Sus tesis se relacionan con las obras de pensadores de distintas disciplinas que tenían una visión similar de los problemas



alejada de la lógica tradicional. La paradoja del conjunto de Bertrand Russell, el principio de incertidumbre de la física cuántica de W. Heisenberg, la teoría de los conjuntos vagos de Max Black, sin olvidar la fundamental aportación del polaco Jan Lukasiewicz, creador de la lógica multivaluada, influyeron para que Zadeh publicase su famoso ensayo "Fuzzy Sets" en "Informations and Control" en 1965 y más tarde "Fuzzy Algorithm" en la misma revista en 1968. Mientras que Russell y Black utilizaron el termino vagueness (vaguedad, vago) para referirse a la nueva lógica o para calificar a los conjuntos en la teorización sobre los mismos, Zadeh prefirió el termino fuzzy (borroso, difuso) para denominar a sus conjuntos y a la lógica en la que se apoya su análisis.

Aunque en un principio la lógica difusa encontró una fuerte resistencia entre la comunidad científica, algunos investigadores se convirtieron en seguidores de las teorías de Zadeh y mientras él siguió ampliando y asentando los fundamentos de la teoría de conjuntos difusos estos investigadores exploraron estas nuevas teorías durante la década posterior a su nacimiento. Además de las contribuciones del propio Zadeh, otros autores como Bellman, Lakoff, Goguen, Kohout, Smith, Sugeno, Chang, dunn, Bezdek, Negoita, Mizumoto, Tanaka, Kandel, Zimmermann, etc... hicieron aportaciones al desarrollo de las bases de esta teoría. Durante esta primera década, gran parte de estructuras lógicas y matemáticas son generalizadas en términos de lógica difusa: relaciones lógicas, funciones, grupos, operaciones, operadores, algoritmos, etc...

Paralelamente al desarrollo de las aplicaciones de la lógica difusa, investigadores teóricos siguen, en la década de los ochenta, el camino iniciado por Mamdani. Así, Takagi y Sugeno desarrollan la primera aproximación para construir reglas fuzzy a partir de datos de entrenamiento, y aunque en un principio no tiene mucha repercusión, mas tarde será el punto de partida para investigar la identificación de modelos fuzzy. Otro de los factores que contribuye a seguir con la investigación en este campo es el creciente interés en las redes neuronales y su similitud con los sistemas fuzzy; la tendencia es buscar vías de relación entre las dos técnicas y los

resultados son los llamados neuro-fuzzy systems, sistemas fuzzy que usan métodos de aprendizaje basados en redes neuronales para identificar y optimizar sus parámetros. B. Kosko es conocido por su contribución a los sistemas neuro-fuzzy y con sus publicaciones introdujo en la lógica difusa a muchos lectores interesados en las redes neuronales.

En realidad, la intención original del profesor Zadeh era crear un formalismo para manipular de forma más eficiente la imprecisión y la vaguedad del razonamiento humano expresado lingüísticamente, sin embargo causo cierta sorpresa que el éxito de la lógica borrosa llegase en el campo del control automático de procesos. Esto se debió básicamente al boom que la lógica borrosa causó en Japón, iniciado en 1987 y que alcanzó su máximo auge a principios de los noventa. Este boom fue el resultado de una estrecha colaboración entre el gobierno, las universidades y las industrias japonesas, estableciéndose dos proyectos nacionales a gran escala llevados a cabo por el Ministerio de Industria y Comercio (MITI) y la Agencia de Ciencia y Tecnología (STA) en consorcio con el LIFE, Laboratory for International Fuzzy Research, y en los que se involucraron más de 50 compañías durante seis años. Desde entonces, han sido infinidad los productos lanzados al mercado que usan tecnología borrosa, muchos de ellos utilizando la etiqueta fuzzy como símbolo de calidad y prestaciones avanzadas. El control difuso ha sido aplicado con éxito en muy diversas ramas tecnológicas, por ejemplo la metalúrgica, robots para la fabricación, controles de maniobras de aviones, sensores de imagen y sonido (sistemas de estabilización de la imagen en cámaras fotográficas y de video Sony, Sanyo y Cannon), lavadoras (Panasonic y Bosch) que son capaces de autorregular la cantidad de jabon que requiere un lavado dependiendo del grado de suciedad de la ropa, aire acondicionado (Mitsubishi) en el que el sistema fuzzy evita las oscilaciones entre el exceso y defecto de temperatura, rice-cooker capaces de elaborar diversas variedades de arroz regulando la cantidad de agua y la temperatura en cada caso para que el grano quede cocido y suelto, en automoción, sistemas de frenado ABS (Mazda y Nissan, control automático de velocidad que controla la frenada en casos peligrosos y selecciona la relación de

marchas a partir del rendimiento del motor, fotocopiadoras (ajusta el voltaje del tambor a partir de la densidad de la imagen, la temperatura y la humedad), lavaplatos (ajusta el ciclo de lavado y enjuague a partir del número de platos y cantidad de comida adherida), ascensores (reduce el tiempo de espera a partir del número de personas), humidificadores (ajusta el contenido de humedad a las condiciones de la habitación), mejoras en imágenes médicas (ajustando el contraste en los bordes), hornos microondas (establece y afina el programa de energía y cocción), neveras (establece los tiempos de descongelación y enfriamiento en función del uso que se haga), televisores (ajusta el color de la pantalla y la textura de cada imagen), mecanismos de atraque automático de naves espaciales, sistemas automáticos de regulación de la cantidad de anestesia que se suministra a los pacientes en un quirófano – *aunque bajo supervisión médica, por supuesto* -, sistemas de concesión – o denegación – automática de créditos según el perfil económico del solicitante, etc...

La lógica difusa está teniendo, por lo tanto, bastante éxito en su utilización sobre los sistemas de control, aplicación que ya podría considerarse como rutinaria, sin embargo, los investigadores buscan nuevos campos de aplicación de esta técnica. Se investiga en áreas como el reconocimiento de patrones visuales o la identificación de segmentos de ADN. Además, según algunos de los más prestigiosos investigadores en Internet, parece que el futuro para abordar la enorme cantidad de datos, recuperar la información, controlar y gestionar la red, pasa por el uso de las tecnologías borrosas. Esta intuición parece ser que coincide con la nueva orientación que según el profesor Zadeh, debe seguir la lógica borrosa. Prueba de ellos fue la celebración del primer encuentro sobre lógica borrosa e internet en el año 2001 (FLINT 2001) en la Universidad de Berkeley organizado por el propio profesor Zadeh.

## 2.2 CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES CARACTERISTICAS.

El primer ejemplo utilizado por el profesor Lofti A. Zadeh, para ilustrar el concepto de conjunto difuso, fue el conjunto “hombres altos”, como muestra la figura 1. Según la teoría de la lógica clásica el conjunto “hombres altos” es un conjunto al que pertenecerían los hombres con una estatura mayor a un cierto valor, que podemos establecer en 1.80 metros, por ejemplo, y todos los hombres con una altura inferior a este valor quedarían fuera del conjunto. Así tendríamos que un hombre que mide 1.81 metros de estatura pertenecería al conjunto hombres altos, y en cambio un hombre que mida 1.79 metros de altura ya no pertenecería a ese conjunto. Sin embargo no parece lógico decir que un hombre es alto y otro no lo es cuando su altura difiere en dos centímetros. El enfoque de la lógica difusa considera que el conjunto “hombres altos” es un conjunto que no tiene una frontera clara para pertenecer o no pertenecer a él: mediante una función que define la transición de “alto” a “no alto” se asigna a cada valor de altura un grado de pertenencia al conjunto, entre 0 y 1. Así por ejemplo, un hombre que mida 1.79 podría pertenecer al conjunto difuso “hombres altos” con un grado 0.8 de pertenencia, uno que mida 1.81 con un grado de 0.85 y uno que mida 1.50 metros con un grado de 0.1. Visto desde esta perspectiva se puede considerar que la lógica clásica es un caso límite de la lógica difusa en el que se asigna un grado de pertenencia 1 a los hombres con una altura mayor o igual a 1.80 y un grado de pertenencia 0 a los que tienen una altura menor.

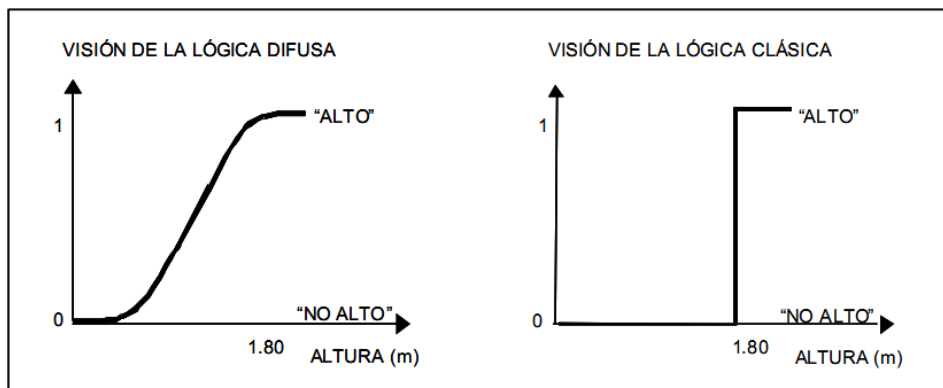


Figura 1. Lógica Clásica VS Lógica Difusa

Así pues, los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos; la teoría clásica de conjuntos solamente contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto, sin embargo la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, es decir, cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor entre 0 y 1. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada  $x$  la función característica  $\mu_A(x)$  proporciona el grado de pertenencia de este valor de  $x$  al conjunto difuso  $A$ .

### 2.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA BASADO EN TECNICAS DE LOGICA DIFUSA.

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

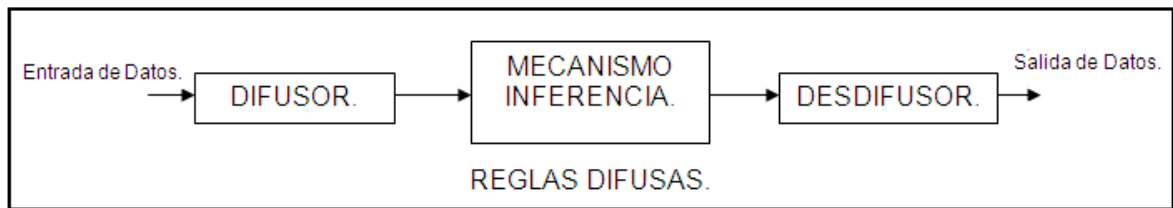


Figura 2. Diagrama de bloques de un sistema basado en técnicas de Lógica Difusa

Está compuesto por los siguientes bloques.

- **BLOQUE DIFUSOR:** bloque en el que a cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se ha considerado, mediante las funciones características asociadas a estos conjuntos difusos. Las entradas a este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.
- **BLOQUE DE INFERENCIA:** bloque que, mediante los mecanismos de inferencia, relaciona conjuntos difusos de entrada y de salida y que representa a las reglas que definen el sistema. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas son también conjuntos difusos, asociados a la variable de salida.

- **DESDIFUSOR:** bloque en el cual a partir del conjunto difuso obtenido en el mecanismo de inferencia y mediante los métodos matemáticos de desdifusión, se obtiene un valor de la variable de salida, es decir, el resultado.

### 2.3.1 MECANISMOS DE INFERENCIA.

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

“Si  $u_1$  es  $A_1$  y  $u_2$  es  $A_2$  y  $u_3$  es  $A_3$  ENTONCES  $v$  es  $B$ ”

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

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

*Ecuación 1.*

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

El resultado de evaluar el multi-antecedente también resultaría en conjunto difuso con función característica:

$$\mu_{A_x}(x) = \mu_{x_1}(x_1) * \mu_{x_2}(x_2) * \dots * \mu_{x_p}(x_p)$$

*Ecuación 2.*

Donde  $*$  representa una t-norma.

Además, con la inferencia difusa podemos asociar las reglas difusas al modus ponens generalizado: cada regla  $R_m$  determina un conjunto difuso  $B_m$  que es el resultado de la composición entre el conjunto difuso resultante de evaluar el antecedente y el conjunto difuso resultante de la implicación, es decir,  $B_m = A_x \circ R_m$ . la función característica asociada a estos conjuntos difusos de salida, es:

$$\mu_{B_m}(y) = \mu_{A_x \circ R^m} = \sup_{x \in A_x} [\mu_{A_x}(x) * \mu_{A \rightarrow B}(x, y)]$$

*Ecuación 3.*

Y finalmente, el conjunto difuso de salida  $B = A_x \circ [R_1, R_2, \dots, R_m]$ , es el resultado de la agregación de todas las reglas que componen la regla base, es decir, de la combinación de los conjuntos difusos  $B_m$  resultantes de todas las reglas. Esta combinación se realiza generalmente mediante una t-conorma ya que, aunque no hay una razón teórica convincente que argumente que sea esta la única manera de hacerlo (de hecho existen y funcionan los sistemas difusos aditivos y la adición no es una t-conorma), en aplicaciones a la ingeniería se obtienen resultados correctos y razonables usando este tipo de operadores.

Entonces concluimos que:

$$B = B_1 + B_2 + \dots + B_M$$

*Ecuación 4.*

A la vista de lo anteriormente expuesto, queda claro que para procesar la información contenida en las reglas y obtener un resultado se deben elegir los operadores matemáticos que corresponden a los siguientes operadores lógicos:

- Los conectivos lógicos entre antecedentes, es decir, los operadores Y (AND, \*), O (OR, +) y NO (NOT, -):  
 “SI  $u_1$  es  $A_1$  y  $u_2$  es  $A_2$  y  $u_3$  es  $A_3$  ENTONCES  $v$  es  $B$ ”
- El operador lógico ENTONCES ( $\rightarrow$ ): implicación.

Además, esto debe realizarse para un conjunto de reglas mediante:



### 2.3.1.1 AGREGACION LOGICA.

Una vez evaluadas todas las reglas y obtenidos los conjuntos difusos de salida modificados, hay que realizar la agregación de todas las reglas para obtener un resultado único de la actuación de todas ellas. Esta agregación es una unión lógica y una vez más para conservar la equivalencia entre lógica clásica y difusa se traduce por una t-conorma: máximo o suma algebraica, obteniéndose así el conjunto difuso de salida, asociado a la variable de salida:

- Si se elige el operador máximo para realizar la agregación, el conjunto difuso de salida será:

$$\mu_B(y) = \max\{\mu_{B_1} * (y), \mu_{B_2} * (y), \dots, \mu_{B_m}(y)\}$$

*Ecuación 5.*

- Si se elige el operador suma, el resultado de la agregación será:

$$\mu_B(y) = \text{sum}\{\mu_{B_1} * (y), \mu_{B_2} * (y), \dots, \mu_{B_m}(y)\}$$

*Ecuación 6.*

## **2.4 IDENTIFICACION DE LA ESTRUCTURA DE UN MODELO BORROSO DEL TIPO TAKAGI-SUGENO.**

La mayoría de las propuestas modernas de control están basadas en un modelo del proceso bajo consideración, por lo que el modelado y la identificación son etapas importantes en el diseño de sistemas de control. Para satisfacer los requerimientos de calidad de los productos, el sistema de control debe garantizar altos requerimientos de calidad sobre un rango amplio de condiciones de operación. Cuando se considera la totalidad del rango de operación, la mayoría de los procesos exhiben un comportamiento fuertemente no lineal y no pueden ser descritos empleando modelos lineales convencionales. Los modelos basados en la lógica borrosa (Yager et al. (1987)), manejan las no linealidades a través de la descomposición del sistema dentro de regiones y mediante el empleo de un modelo no lineal simple en cada región.

El concepto de identificación implica el empleo de técnicas que permiten construir modelos matemáticos a partir de la información contenida en un conjunto de datos de entrada y salida del sistema. En general, el proceso de identificación se realiza en tres etapas: Identificación del medio ambiente, la identificación de la estructura y la identificación de los parámetros. La identificación del medio ambiente consiste en encontrar las variables que afectan la salida en forma significativa, esto es, determinar las variables de entrada. La identificación de la estructura depende del modelo borroso empleado y está determinada por la relación de entrada-salida.

En general concierne determinar el número de reglas y la partición del espacio de entrada-salida. Las reglas de la forma si-entonces poseen dos estructuras: la estructura del antecedente y la del consecuente. En modelos del tipo Takagi-Sugeno las reglas son de la forma:

$$\begin{aligned}
 R^i: & \text{ Si: } & x \text{ es } A^i(x) \\
 & \text{ entonces: } & y^i = f^i(x)
 \end{aligned}$$

*Ecuación 7.*

Donde  $x = [x_1 \dots x_M]$  son las entradas,  $y^i$  es la salida de cada regla y  $A^i(x)$  es un conjunto borroso M – dimensional. La estructura del consecuente de cada regla está definida por  $f^i(x)$ . En general se elige una función lineal de las entradas, esto es

$$f^i(x) = p^i_0 + p^i_1 x_1 + \dots + p^i_M x_M$$

*Ecuación 8.*

Donde  $p^i_j$  son escalares. La salida del modelo se obtiene a través del promedio pesado de la salida de cada regla

$$y = \frac{\sum_{i=1}^I w^i(w_1, \dots, w_{1m}) y^i}{\sum_{i=1}^I w^i(w_1, \dots, w_{1m})}$$

*Ecuación 9.*

Donde  $w^i$  es el grado de verdad (valor de pertenencia) de la regla i – ésima. El modelo borroso de Takagi-Sugeno está basado en una “partición borrosa” del espacio de entrada y se lo puede interpretar como una extensión de la linealización por sectores. La identificación de la estructura de las premisas consiste en encontrar los diferentes conjuntos borrosos que dividen el espacio de entrada. Generalmente, se eligen para cada variable de entrada conjuntos borrosos de una dimensión y se realiza una composición con el conectivo lógico “y” (AND), resultando:

$$A^i(x) = A^i_1(x) \text{ y } A^i_2(x) \text{ y } \dots \text{ y } A^i_M(x)$$

*Ecuación 10.*

Los parámetros del consecuente son los usados por (2) y los parámetros del antecedente son los que definen los conjuntos borrosos que particionan el espacio de entrada.

Debido a que la identificación de la estructura y de los parámetros no puede realizarse separadamente, el proceso de identificación en general se convierte en uno muy complejo, por lo que debe ser realizado en aproximaciones sucesivas para obtener el resultado deseado.

### **3. METODOLOGIA.**

En esta tesis de grado se propone una metodología para la obtención de la estructura de un sistema modelado con lógica borrosa del tipo Takagi-Sugeno. La identificación de la estructura del modelo se basa en la obtención de las derivadas parciales de la salida muestreada respecto a las entradas.

#### **3.1 PORQUE EN UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL.**

El control de nivel de líquido en depósitos y el flujo entre ellos es un problema básico en los procesos industriales. Los procesos industriales requieren líquidos para ser bombeados, almacenados en tanques y luego bombeados a otro tanque. Muchas veces el líquido será procesado por tratamientos químicos en los tanques, pero siempre el nivel de fluido en los tanques debe ser controlado, y el flujo entre ellos regulado. Con frecuencia los tanques son acomodados tan juntos que los niveles interactúan lo cual debe ser controlado también. El control del nivel y el flujo en tanques son el centro de todos los sistemas de ingeniería química. Pero estos sistemas son también el centro de nuestra economía.

Estas son algunos tipos de industria donde el control de nivel y el flujo son esenciales.

3. Industrias de Petroquímica.
4. Industrias de fabricación de papel.
5. Industrias de tratamiento de agua.

Nuestras vidas son gobernadas por sistemas de control de nivel y flujo. Por ejemplo, la sicología médica envuelve muchos sistemas de Biocontrol de fluidos. Los Biosistemas en nuestro cuerpo están para controlar el flujo de sangre alrededor de nuestro cuerpo. Otros Biosistemas controlan la presión y los niveles de químicos en nuestro cuerpo. El baño de nuestra casa o apartamento es también un sistema de control del nivel de líquido. La palanca adjunta a la válvula

del tanque de la taza permite al agua fluir dentro del tanque hasta que el flotador sube hasta un punto que cierra la válvula. Este es un simple y efectivo sistema de control del nivel para depósitos de agua.

Un ejemplo que existe a nivel mundial es el asombroso lago *Silveretta Hochalpenstrasse*, consiste de un sistema gigante de tanques acoplados, el *Silveretta Stausee*. Este tiene 2034 metros de alto, Es uno de los más profundos lagos artificiales en Europa. El *Silveretta Stausee* esta acoplado con el *Vermunt Strausee* de 1717 metros y con su sistema eléctrico es el sistema de depósitos acoplados más alto y largo del mundo. Los ingenieros que diseñaron y construyeron deben estar muy orgullosos de sus logros y paneles cercanos al *Strausee* describen el proyecto.

Los sistemas de control de nivel de depósito están en todos lados. Todos los procesos industriales, el cuerpo humano y los sistemas que manejan fluidos dependen de sistemas de control de nivel. Es muy importante para nosotros, entender cómo trabajan los sistemas de control en los depósitos y como es resuelto el problema del control de nivel.

### 3.2 ANALISIS DEL CONTROL DE LA SERVO VALVULA.

Como primer paso para el desarrollo del proyecto, se realizarón algunas prácticas propuestas en el laboratorio de control para poder entender el principio de funcionamiento de la servo-válvula y su comportamiento dentro del sistema de control.

De estas prácticas se tomaron los datos que caracterizan al sistema que fueron útiles al momento de implementar el nuevo sistema digital. Dichos datos serán expuestos cuando hablemos del controlador en el capítulo 7.

- Fuente de corriente gradual de 4 – 20 mA suministrada por la interfaz.
- Power supply        24 VAC +- 20% 50-60 Hz
- Input Impedance    100kohm (0,1 Kohm), 500 Ohm
- Running time        95 seconds
- Feedeback output U    2-10 VDC

### 3.3 MODULO FEEDBACK DE NIVEL Y FLUJO PROCON 38-001.

El módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001 que se presenta en la figura 4; es un sistema de un único lazo que permite el estudio de los principios del control de procesos, usando nivel de líquido y tasas de flujo como las variables medidas del proceso. El sistema es completamente independiente, es un circuito de agua a baja presión que fluye en una estructura acoplada a un panel, haciéndolo apto para el trabajo individual o para grupos.

Consta de un tanque superior de doble compartimiento enlazado a un tanque de desagüe por medio de válvulas manuales y solenoides. El agua es bombeada por el sistema a través del medidor de flujo y la servo-válvula. El nivel es medido en el tanque superior, y el flujo es medido mediante un flujómetro ubicado en la parte inferior derecha de la tubería.

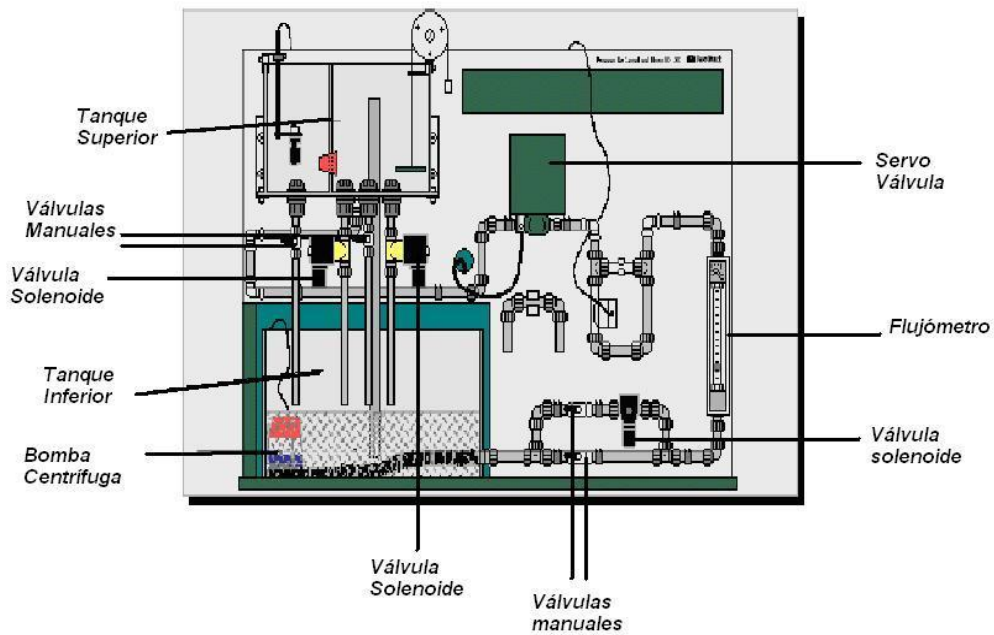


Figura 3. Módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001



### **3.3.1 CARACTERÍSTICAS.**

- I. Contiene una serie de sensores e indicadores de nivel y flujo.
- II. El flujo es controlado por la servo-válvula.
- III. Control ON/OFF y proporcional.
- IV. Control proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo.
- V. El agua es utilizada como el fluido del proceso.
- VI. Bomba centrífuga que entrega hasta 5 Lt/s.
- VII. Puede ser acoplado al módulo de temperatura para obtener un doble lazo de control.

### **3.3.2 PRINCIPALES ELEMENTOS DEL MÓDULO.**

- I. Tanque de desagüe.
- II. Tanque superior de doble compartimiento.
- III. Bomba.
- IV. Flujo metro.
- V. Servo-válvula.
- VI. 3 válvulas solenoides.
- VII. 4 válvulas manuales.
- VIII. Sensor de flujo.
- IX. Sensor de nivel tipo flotador.
- X. Interruptor ON/OFF de nivel tipo flotador.

### **3.3.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.**

El equipo es una planta para el modelado de nivel y flujo de agua. Este consiste en dos tanques (inferior y superior) y una bomba centrífuga que lleva el agua desde el tanque inferior hacia el tanque superior a través de una red de tuberías.

Diferentes tipos de válvulas unidas a las tuberías que controlan el nivel de agua en el tanque superior y el flujo conducido por la tubería. Hay manuales, servo válvulas de operación eléctrica y válvulas solenoides.

Mediciones de nivel y flujo son tomadas por varios sensores y visualizadas por sus correspondientes indicadores.

Además unidades auxiliares de acondicionamiento de señal tales como el transmisor de nivel tipo flotador y transmisor de flujo por pulsos.

Está conectada al sistema y proporciona todas las alimentaciones necesarias para el módulo, sensores y controlador. Suministra una fuente de corriente de 4 – 20 mA, dos convertidores de corriente a voltaje y un comparador de voltaje con histéresis ajustable.

## 4. RESULTADOS.

### 4.1 MODELADO MATEMATICO DEL MODULO DE NIVEL.

Para realizar y desarrollar este modelo matemático, se tuvo en cuenta las reglas y descripciones de la lógica difusa del tipo Takagi-Sugeno. Ya que con este método se obtienen los parámetros que definen los conjuntos borrosos de entrada del sistema.

#### 4.1.1 MODELO MATEMATICO DEL TANQUE.

Es importante entender cómo se comportan los sistemas de depósitos acoplados empleando la termodinámica desde el punto de vista de la hidráulica básica. Este es un modelado de sistemas y es una parte muy importante de análisis de sistemas de control. Inicialmente se irá a modelar mediante matemática básica el módulo de nivel que se encuentra en el laboratorio de Sistemas de Control. También es necesario conocer un poco sobre el proceso de los elementos hidráulicos (Bomba, válvulas, etc) y sus debidas técnicas para el envasado de líquido.

Para empezar, observemos un breve esquema del módulo de nivel y flujo.

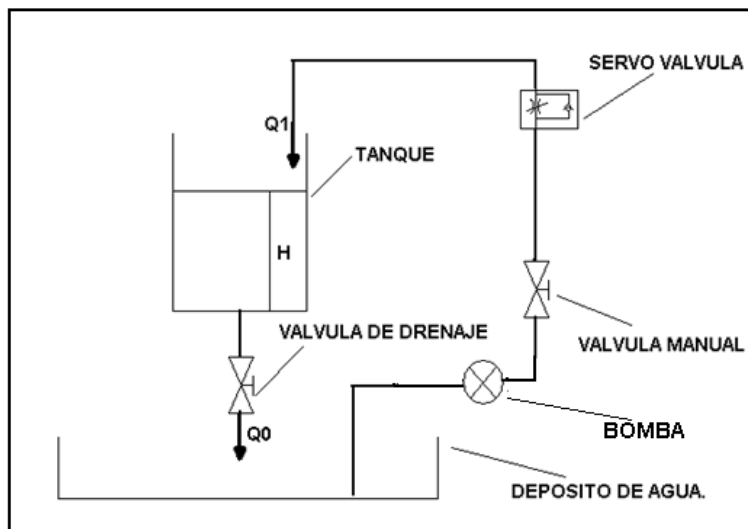


Figura 4. Circuito de agua del módulo de nivel y flujo.

A continuación se desarrollo el modelo matemático aplicando las técnicas de lógica difusa del tipo Takagi-Sugeno.

El modelo del sistema, está determinado para relacionar el flujo  $Q_i$  que entra al tanque con el flujo  $Q_o$ , dejando la válvula de drenaje al sistema del tanque. Utilizando una ecuación de equilibrio de flujo dentro del tanque, es posible escribir:

$$Q_i - Q_o = A \frac{dH}{dt}$$

*Ecuación 11.*

Donde  $A$  es el área transversal del tanque y  $H$  es el peso del fluido.

Si la válvula de drenaje se elaboró para comportarse como un orificio, entonces el fluido que pasa por la válvula será relacionado con el nivel de fluido en el tanque,  $H$ , por la expresión:

$$Q_o = C_d a \sqrt{2g.H}$$

*Ecuación 12.*

En esta ecuación 24 “ $a$ ” es el área transversal del orificio, (en la vida real – practica, el área transversal está dada por las dimensiones de la válvula de drenaje y el canal de flujo en el cual está montado). Este coeficiente toma en cuenta todas las características del fluido, perdidas e irregularidades en el sistema como ambos lados de la ecuación de balance. Y  $g = \text{cte gravitacional} = 980 \text{ cm/s}^2$ .

En la ecuación 24, se toma a  $C_d$  como una constante por lo que  $Q_o$  tiene una relación no lineal con el nivel  $H$ , para todas las posibles condiciones de operación. Idealmente, la relación no lineal está definida por la ecuación anterior, pero en una válvula real existe una ecuación no lineal más compleja. Combinando las ecuaciones 23 y 24, anteriormente expuestas, se obtendrá lo siguiente.

$$A \frac{dH}{dt} + C_d a \sqrt{2gH} = Q_i$$

*Ecuación 13.*

Con esta ecuación 25, se obtiene el modelo matemático que describe el comportamiento del sistema brevemente, y podemos ver de nuevo cosas no lineales en el modelado del sistema. Esto tiene el resultado importante que el modelo del sistema linealizado tiene parámetros que dependen de las condiciones de operación.

El modelo del sistema, (Ecuación 13), es una ecuación diferencial de primer orden, la cual me relaciona el nivel de flujo de entrada,  $Q_i$ , con el nivel de flujo de salida del agua,  $H$ . Para poder diseñar un controlador lineal para la servo válvula, el cual controla el nivel del tanque, se debe linealizar la ecuación, considerando pequeñas variaciones “ $h$ ” cerca del nivel normal de operación del fluido en el tanque. Para poder realizar dicho proceso, utilizo la ecuación siguiente:

$$H = H^o + h$$

*Ecuación 14.*

Donde  $H_o$  es el nivel normal de operación, y es una constante, “ $h$ ” es un pequeño cambio cercano a ese nivel. Para pequeñas variaciones de “ $h$ ” cercanas a  $H_o$  puedo aproximar la función no lineal mediante la tangente de  $H_o$ . Esto me permite realizar una ecuación lineal que es la siguiente:

$$T \frac{dh}{dt} + h = g \cdot q_i$$

*Ecuación 15.*

Donde  $q_i$  es la variación en el flujo de entrada  $Q_i$ , necesitado para mantener el nivel de operación  $H^o$ . La constante de tiempo  $T$  y la ganancia  $g$  son función de los parámetros y niveles de operación.

## 4.2 MODELO MATEMATICO DE DEPOSITOS DE TANQUES ACOPLADOS.

A continuación se establece el diagrama para depósitos de tanques acoplados.

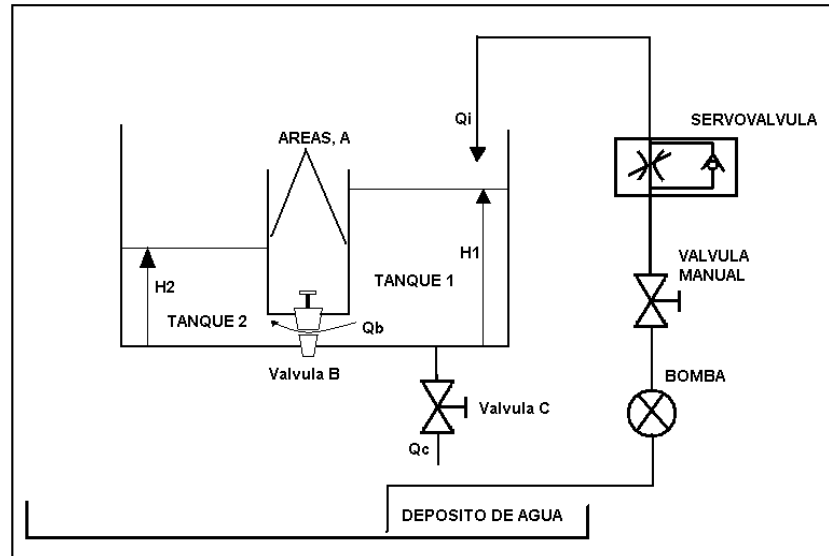


Figura 5. Depósitos de Tanques Acoplados.

El objetivo para este depósito de Tanques Acoplados consiste en ajustar la corriente de entrada hacia la servo válvula que se muestra en la figura 7. De tal modo que el nivel del tanque 2 se conserva en el estado estable. La salida medida está en el nivel del segundo tanque y se denota por la señal  $y_2$ . Se puede aplicar un adaptador de señal tipo PI para este sistema. Pero si el nivel exacto no es tan importante entonces se irá a diseñar y construir un adaptador de señal más simple.

### 4.3 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DEL TIPO TAKAGI-SUGENO.

#### 4.3.1 MODELO EMPLEADO.

En el modelo borroso propuesto por Takagi-Sugeno (1985), la estructura del antecedente describe regiones borrosas en el espacio de entrada, y la del consecuente presenta funciones lineales (no borrosas) de las entradas del modelo. Las reglas son de la forma:

$$R^i: \text{Si } x_1 \text{ es } A^i_1(x) \text{ y } \dots \text{ y } x_M \text{ es } A^i_M(x)$$
$$\text{entonces } : y^i = p^i_0 + p^i_1 x_1 + \dots + p^i_M x_M$$

*Ecuación 16.*

Donde  $x = [x_1, \dots, x_M]^T$  son las entradas,  $A^i_1(x_1), \dots, A^i_M(x_M)$ , son los conjuntos borrosos definidos sobre las entradas y  $p^i_j$  son escalares. La salida del modelo,  $y$ , es calculada como un promedio pesado de la contribución de cada regla

$$y = \frac{\sum_{i=1}^L w^i(x) y^i}{\sum_{i=1}^L w^i(x)}$$

*Ecuación 17.*

Donde  $L$  es el número de reglas y  $w$  es el grado de pertenencia (grado de cumplimiento) de la  $i$ -ésima regla del antecedente.

### 4.3.2 JUSTIFICACION DEL METODO.

Suponiendo una función continua arbitraria de M entradas y una salida

$$y = f(x_1, \dots, x_M)$$

*Ecuación 18.*

Se desea aproximarla con el grado de precisión necesaria mediante un modelo borroso del tipo Takagi-Sugeno de la forma

$$y = \sum_{i=1}^L \varphi^i(x) (p^i_0 + p^i_1 x_1 + \dots + p^i_M x_M)$$

$$\text{donde } \varphi^i(x) = w^i(x) / \sum_{j=1}^L w^j(x)$$

*Ecuación 19.*

Se realiza un muestreo con N muestras dando el conjunto de datos  $\{x(i), y(i)\}_{i=1}^N$  donde  $x(i) = [x_1(i), \dots, x_M(i)]$ . Se define un entorno  $E(x(i))$  alrededor de cada punto de muestra  $x(i)$  de tal manera que la intersección de los entornos para las distintas muestras es vacía. Un dato cualquiera  $x(q)$  (distinto de los valores muestreados) pertenece al entorno del punto  $x(i)$  que presenta la menor distancia. Para  $x(q)$  se puede realizar una aproximación de primer orden mediante el desarrollo de la serie de Taylor.

$$y(q) = \sum_{i=1}^L \varphi^i(x(q)) \left( y(i) + \frac{dy}{dx_1}(i) (x_1(q) - x_1(i)) + \dots + \frac{dy}{dx_M}(i) (x_M(q) - x_M(i)) \right)$$

$$w^i(x(q)) = \begin{cases} 1 & \text{si } x(q) \in E(x(i)) \\ 0 & \text{si } x(q) \notin E(x(i)) \end{cases}$$

*Ecuación 20.*



Donde  $\frac{dy(i)}{dx_j}$  es la derivada parcial de la salida, respecto de la entrada  $x_1$  evaluada en el punto  $[x(i),y(i)]$ . Operando

$$y(q) = \sum_{i=1}^N \varphi^i(x(q))(p^i_0 + p^i_1 x_1(q) + \dots + p^i_M x_M(q))$$

Donde:

$$p^i_0 = - \frac{dy}{dx_1}(i)x_1(i) - \dots - \frac{dy}{dx_M}(i)x_M(i) + y(i)$$

$$p^i_j = \frac{dy}{dx_j}$$

*Ecuación 21.*

Este modelo borroso con N reglas (1 regla para cada muestra) puede aproximar mediante interpolación cualquier salida para entradas definidas dentro del espacio  $x_j(q) \in [\min(x_j), \max(x_j)]$ . Además tiene la forma del modelo borroso dado por Takagi-Sugeno. Se refiere en adelante a estas N reglas como “reglas básicas”. Se puede considerar que cada regla básica queda especificada por el vector de dimensión 2M+1 dado por

$$\varphi(i) = [x_1(i), \dots, x_M(i), y(i), \frac{dy}{dx_1}(i), \dots, \frac{dy}{dx_M}(i)]$$

*Ecuación 22.*

Se define la distancia entre dos reglas básicas como la distancia entre los vectores que la especifican, esto es:

$$d(R^i, R^j) = \|\varphi(i) - \varphi(j)\|$$

*Ecuación 23.*

Donde  $\| \cdot \|$  indica una norma y  $R^i$  especifica la regla  $i$ . si la distancia entre dos reglas es menor, esto es que los parámetros que la constituyen están más próximos entre sí, entonces las reglas serán más similares entre sí.

En general, no es útil en las aplicaciones un modelo borroso con tantas reglas como muestras, se debe realizar un proceso de reducción del número de las mismas, una alternativa valida para la reducción es poder sintetizar en una regla grupos de reglas básicas próximas entre sí.

### 4.3.3 APLICACIÓN DEL METODO DE IDENTIFICACION.

En el trabajo se suponen conocidas las variables de entrada al sistema, esto es, no se considera la identificación del medio ambiente (una propuesta para identificar el medio ambiente se encuentra en Sugeno y Yasukawa (1993)). Teniendo en cuenta lo anterior, el paso a seguir para la identificación es el siguiente:

- Determinar el gradiente de la señal muestreada, esto es, determinar para cada muestra la derivada parcial de la salida con respecto de cada entrada. Como este dato no se conoce se realiza un método aproximado para la obtención del mismo. Dado un sistema con múltiples entradas y una salida, para cada medición se cumple

$$y(i) = f(x_1(i), x_2(i), \dots, x_M(i)) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N$$

*Ecuación 24.*

Se dispone de K mediciones de entrada-salida próximas al valor de muestra i y se desea encontrar el gradiente de la función para cada punto de muestra i dado por

$$\nabla y(i) = \left( \frac{dy}{dx_1}(i), \frac{dy}{dx_2}(i), \dots, \frac{dy}{dx_M}(i) \right)$$

*Ecuación 25.*

Realizando una aproximación por Taylor de primer orden sobre la función original se tiene que:

$$y(k) = y(i) + \frac{dy}{dx_1}(i)(x_1(k) - x_1(i)) + \dots + \frac{dy}{dx_M}(i)(x_M(k) - x_M(i))$$

*Ecuación 26.*

Operado resulta:  $e_i(k) = \phi_i(k)\theta_i(k)$

$$\phi_i(k) = [(x_1(k) - x_1(i)), \dots, (x_M(k) - x_M(i))]$$

*Ecuación 27.*

$$\phi_i(k) = \left[ \frac{dy}{dx_1}(i) \dots \frac{dy}{dx_M}(i) \right]^T$$

*Ecuación 28.*

Para las K muestras se puede formar el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$Ax = b$$

Donde:

$$A = [\phi_i(1)^T, \dots, \phi_i(k)^T], b = [e_i(1), \dots, e_i(k)]^T$$

*Ecuación 29.*

$$x = \left[ \frac{dy}{dx_1}(i) \dots \frac{dy}{dx_M}(i) \right]^T$$

*Ecuación 30.*

Debido a que los K datos de muestras pueden estar a distinta distancia al punto donde se desea obtener el gradiente, se define una función que toma en cuenta con mayor peso los puntos de muestra cercanos al punto i. La función de peso se puede definir de la forma

$$w_{kk}(i) = e^{-\delta \|x_k - x(i)\|}$$

*Ecuación 31.*

Este método de identificación del tipo Takagi-Sugeno, se desarrolló con la finalidad de ser aplicado en el diseño y elaboración del adaptador de señal; el cual me servirá para el control del servo-válvula, correspondiente al módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001.

Dicho esto, a continuación se presenta la fabricación de este adaptador de señal.

#### 4.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ADAPTADOR DE SEÑAL.

El adaptador de señal que se construyó, tiene las siguientes reglas difusas y se elaboró teniendo en cuenta las reglas de lógica difusa del tipo Takagi-Sugeno.

- **SI** [nivel muy alto] **ENTONCES** [reducir la corriente en la servo válvula]
- **SI** [nivel muy bajo] **ENTONCES** [incrementar la corriente en la servo válvula]
- **SI** [nivel correcto] **ENTONCES** [fijar la corriente en la servo válvula]

El primer paso que se debe tener en cuenta consiste en convertir la señal (puede ser una señal de error en el sistema) en un conjunto de variables difusas. Este paso se nombrará FUZZIFICACIÓN. Esto se hace asignando valores (dichos valores son escogidos por el tesista) a partir de un conjunto de funciones de membrecía o pertenencia. Los valores de cada función de pertenencia serán etiquetas con  $\mu(x)$ , y son determinados por el valor de la señal x y la figura de cada función de membrecía.

Los rangos posibles en los cuales puede clasificarse el valor de la señal x, es el siguiente.

- a) **LP:** x es Largo Positivo.
- b) **MP:** x es Medio Positivo.
- c) **S:** x es Pequeño.
- d) **MN:** x es Medio Negativo.
- e) **LN:** x es Largo Negativo.

Esta función de membrecía para tres de estos cinco casos de nivel difuso expuestos, se muestran a continuación. Por ejemplo, el valor (o variable difusa) para la función de membrecía MP y un valor de la señal de entrada de  $x= 5$  mA es igual a  $\mu_{mp}(5) = 0.5$

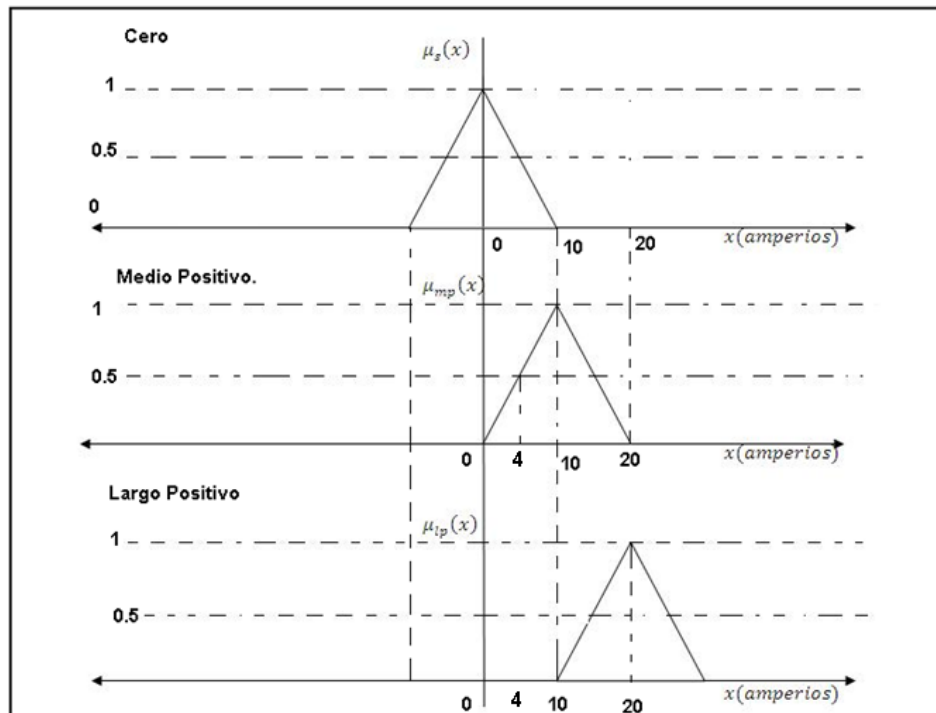


Figura 6. Función de membrecía para el rango pequeño (S), Medio Positivo (MP) y Largo Positivo (LP).

La figura 7, solo muestra las formas de las membrecías S, MP, y LP. Las otras dos MN y LN, tienen la misma forma que MP y LP, pero con el eje x en forma inversa.

La forma de membrecía en la figura 7, se conoce como triangular, que es solamente una de muchas opciones para implementar dichas funciones de membrecía. Yo usé la forma triangular porque es la más usada, tiene una implementación sencilla y ofrece buenos resultados.

En los sistemas difusos tipo Takagi Sugeno, los valores que arrojan los resultados de las diferentes reglas que se han activado en un momento determinado ya son valores numéricos por lo que no se necesita una etapa de desfuzzificación.

Para calcular la salida del sistema difuso se consideran los diferentes resultados teniendo en cuenta el valor que se activó el antecedente de cada una de las reglas, para un sistema con dos reglas (nivel y flujo), la salida del sistema difuso es:

$$y = \frac{w_1 y_1 + w_2 y_2}{w_1 + y_2}$$

*Ecuación 32.*

La ecuación 32, hace referencia a la salida del sistema del módulo de nivel y flujo mediante un sistema difuso del tipo Takagi-Sugeno.

Donde:

- $W_1$  y  $W_2$ , hace referencia al nivel del tanque.
- $Y_1$  y  $Y_2$ , hace referencia a la cantidad de flujo que pasa por la Servo-válvula.

Se muestra de una forma más detallada como es el funcionamiento de un sistema difuso Takagi-Sugeno.

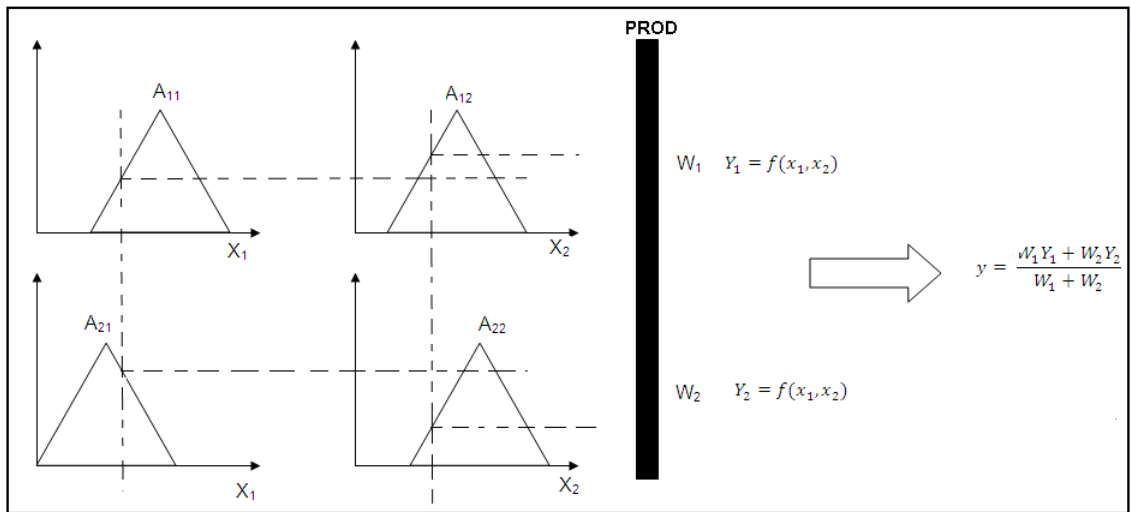


Figura 7. Funcionamiento de un sistema difuso del tipo Takagi Sugeno.

En este caso.

- $y_1 = f_1(x)$
- $y_2 = f_2(x)$



#### 4.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL ADAPTADOR DE SEÑAL.

Estos datos se adquirieron utilizando el adaptador de señal en el control de la servo-válvula del módulo FEEDBACK de nivel y flujo PROCON 38-001.

Los datos obtenidos son los siguientes.

Datos del Módulo Voltaje Sensor Vs. Porcentaje de Nivel	
$V_{IN}$ (v)	% (Llenado del tanque)
1,97	90
1,51	61
1,48	60
1,33	50
1,24	45
1,16	40
1,07	35
0,98	30

Estos datos se tomaron con el fin de observar la respuesta del sistema, como se puede observar en la Figura 9. Se tiene un comportamiento lineal.

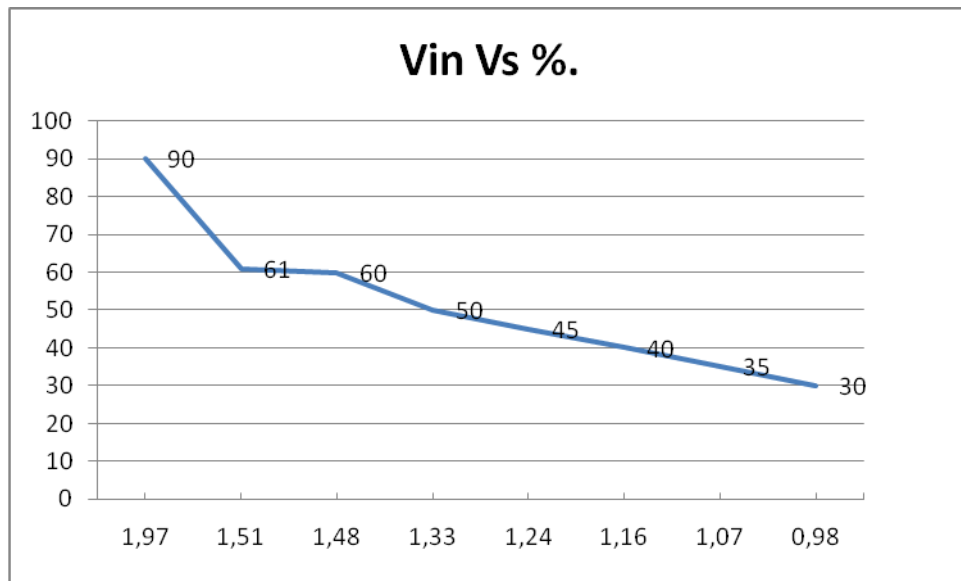


Figura 8. Voltaje de entrada (sensor) Vs. % (Llenado Tanque)

El diseño de la tarjeta del adaptador de señal se realizó en el software Eagle 5.0 Profesional y es el siguiente.

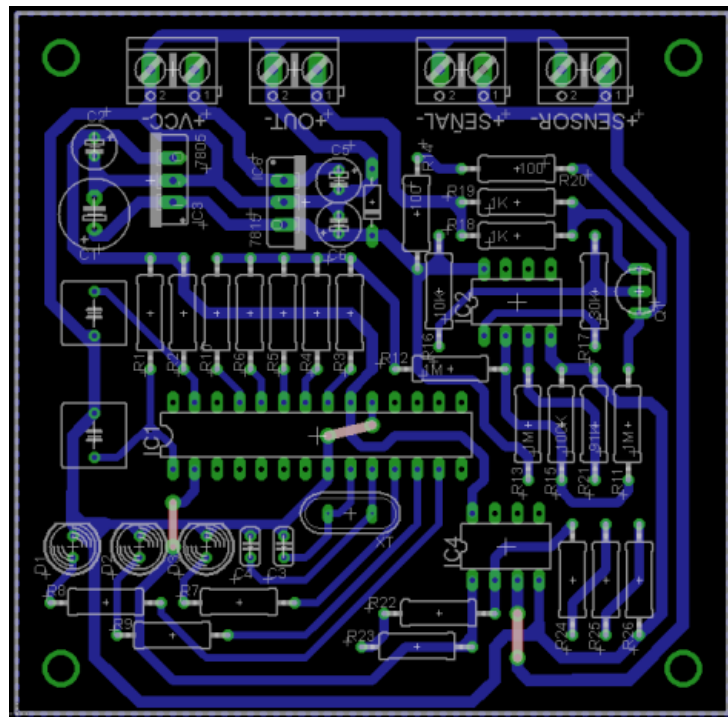
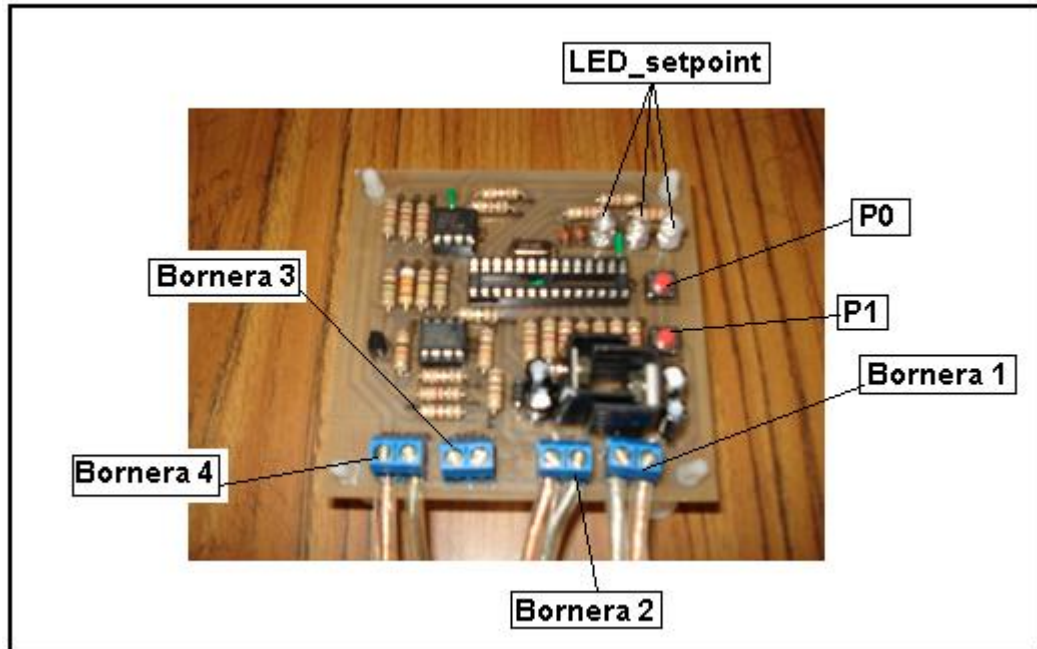


Figura 9. Diseño de la tarjeta del Adaptador de Señal.

#### 4.4.2 INDICACIONES PARA EL MANEJO DEL ADAPTADOR DE SEÑAL.



*Figura 10. Indicaciones para el manejo del controlador*

- i. Conectar el circuito de la tarjeta a una fuente de alimentación de +30 Vdc en la Bornera 1.
- ii. Conectar la servo válvula a la Bornera 2.
- iii. Conectar el sensor a la Bornera 4.
- iv. El pulsador P0, hace referencia al reinicio del sistema.
- v. El pulsador P1, hace referencia al pulsador para seleccionar el setpoint.
- vi. El setpoint se refleja en los diodos led.

#### 4.5 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA.

A continuación se muestra el diagrama de bloques del sistema.

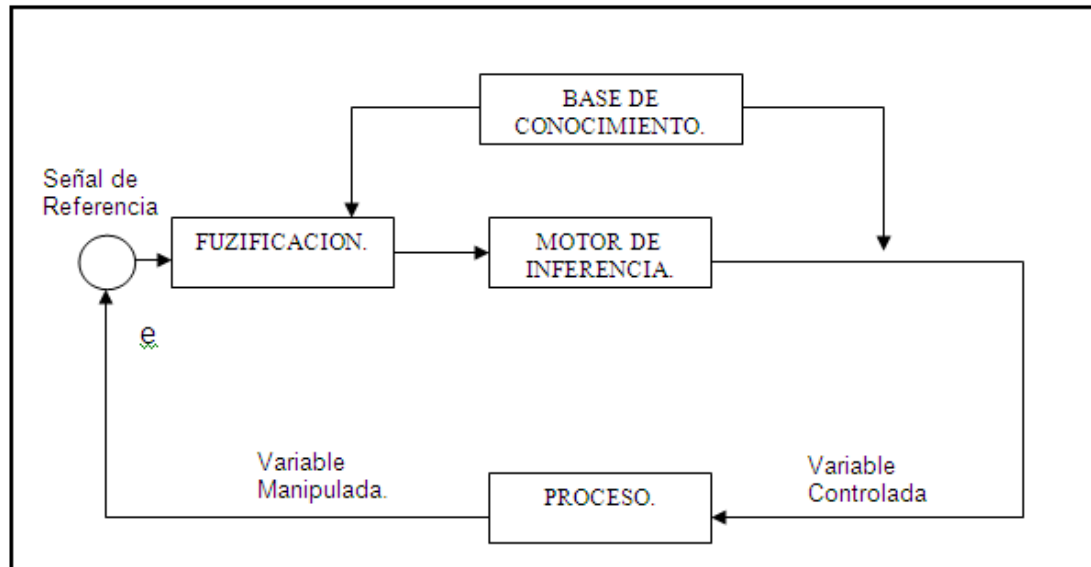


Figura 11. Diagrama de Bloques del sistema

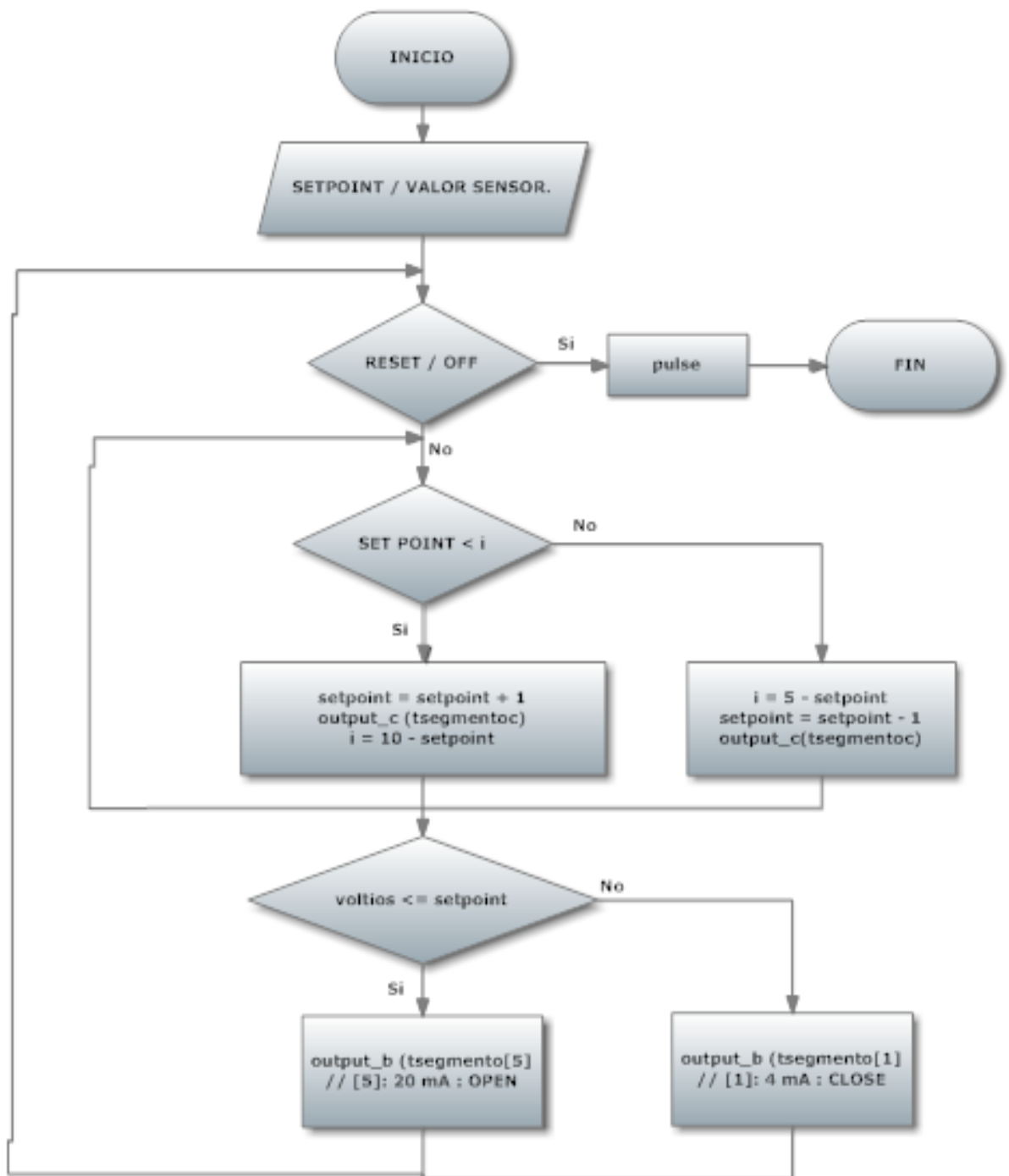
e: Variable difusa correspondiente al error.

- **Etapa de Fuzzificación:** Es la etapa inicial del controlador difuso. La idea principal consiste en la transformación de las variables controladas entregadas por sensores del proceso (si los hay). Estas variables son valores que deben ser procesados por el sistema difuso, y se hace necesario convertirlo a un lenguaje que el mecanismo de inferencia pueda procesar. Esta es la función del fuzzificador, que toma los valores numéricos provenientes del exterior y los convierte en valores difusos que pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia.
- **Base de conocimiento:** la base de conocimiento está formada por dos componentes básicos, *la base de datos y la base de reglas de control difuso*. Los conceptos asociados con la base de datos son usados para

caracterizar las reglas del control difuso, y la base de reglas permite la toma de acciones de control. Estos conceptos se definen subjetivamente en base a, por ejemplos, operarios expertos en el proceso.

- **Mecanismo o motor de inferencia:** La tarea del sistema de inferencias es tomar los niveles de pertenencia y apoyado en la base de reglas generar la salida del sistema difuso.
- **Proceso:** Hace referencia al dispositivo a controlar.

#### 4.6 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA.



## 5. RECOMENDACIONES.

- Manipular con cuidado el adaptador, de lo contrario, se afecta la toma de medidas.
- Este adaptador de señal, se diseñó para cualquier tipo de dispositivos que reciba entrada de 4 – 20 mA.
- El adaptador de señal se diseñó para realizar este proceso de forma digital, seleccionando el setpoint de acuerdo a tres (3) posiciones preestablecidas por medio de un pulsador P1 e ir obteniendo la señal de corriente deseada en la salida a medida que se oprima el pulsador, su indicador estará en los diodos led.
- Se pueden realizar mejoras en el controlador, en la parte de la visualización se puede instalar una pantalla LCD.

## 6. CONCLUSIONES.

- En este trabajo se logro implementar el uso de las técnicas de lógica difusa y realizar un modelo matemático basándonos en las leyes de la termodinámica y haciendo énfasis en el diseño de maquinas hidráulicas, para el control de nivel y flujo de un líquido.
- Se diseño un circuito digital, el cual permitió la implementación del control difuso para controlar el nivel de fluido en el Tanque, mediante el control de la servo válvula del módulo de nivel y flujo.
- Se estudio y se expuso las técnicas de control difuso y su aplicación en los diferentes dispositivos electrónicos que existen hoy en día.



## 7. BIBLIOGRAFIA.

- BORDONS, Carlos. 2005. **Introducción al control borroso**, In: *Departamento Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.* España.
- PEÑA, Miguel. DI SCIASCIO, Fernando. CARELLI, Ricardo. 2007. **Identificación de la estructura de un modelo borroso del tipo Takagi-Sugeno**, In: *Instituto de Automática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.* Argentina.
- KATAYAMA, Tohru. 2005. **Subspace methods for system identification.** *Automatica.*
- LJUNG, Lennart. 2005. **System identification, theory for the user.** *Sistemas de Control.*
- ROBAYO, Edgar M. 2007. **Fundamentos y aplicaciones.** *Control difuso.* *Universidad del Norte.* Barranquilla.
- BURR-BROWN, Products. **Texas Instruments.** XTR111, 4-20mA Precision Voltage to Current. Converter / Transmitter.
- FEEDBACK. Edition 1. I 38S-1. **PROCON** – Process Control Trainers.
- ICONTEC. 2008-07-23. **Trabajos escritos:** presentación y referencias bibliográficas.
- ADDISON WESLEY. **RC Dorf and RH Bishop.** Modern Control Systems.

- YUNUS A. CENGEL Y MICHAEL A. BOLES. **Termodinámica**. Tomo 1 – Segunda edición. MC Graw Hill.
- LOFTY A. ZADEH. 1965. **Fuzzy Sets**. Information's and Control.