

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE  
CONTROLADORES INTELIGENTES DIFUSOS Y CONTROLADORES  
PID PARA APLICACIONES INDUSTRIALES

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER (MSc.)

DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

ING. LUIS PATRICIO ALOMÍA VIVER

[patricioalomia@gmail.com](mailto:patricioalomia@gmail.com)

ING. CARLOS ANDRÉS BASTIDAS ALDAZ

[andresbastidas@live.com](mailto:andresbastidas@live.com)

DIRECTOR: PH. D. MSC. ING. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

[alvaro.aguinaga@epn.edu.ec](mailto:alvaro.aguinaga@epn.edu.ec)

Quito, Abril 2013

## DECLARACIÓN

Nosotros, Luis Patricio Alomía Viver y Carlos Andrés Bastidas Aldaz, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

Luis Patricio Alomía Viver

---

Carlos Andrés Bastidas Aldaz

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los Ingenieros Luis Patricio Alomía Viver y Carlos Andrés Bastidas Aldaz bajo mi supervisión.

PH. D. MSC. ING. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento a la **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL** y sus personeros por todo lo que me han brindado para el desarrollo de mi vida profesional y personal.

*Patricio*

Agradezco infinitamente a la escuela y sus excelentes profesores que nos realizan profesionalmente, gracias a su nombre y prestigio, nuestras labores profesionales están respaldadas, ayudándonos a ser competitivos en el ámbito laboral.

*Andrés*

## DEDICATORIAS

*A esa Hermosa mujer que puso Dios en mi vida y al fruto de nuestro amor*

*Mateo, Alejandro, Felipe.*

***Patricio***

Dedico el desarrollo de esta tesis a mis padres, que con gran esfuerzo y cariño me han ayudado a cumplir cada una de mis metas, como siempre mil gracias, se les quiere mucho.

***Andrés***

## CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.1.2	JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	1
1.1.3	HIPÓTESIS.....	2
1.1.4	OBJETIVOS.....	2
1.1.5	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	2
2	CAPÍTULO 2.....	4
2.1	MARCO TEÓRICO.....	4
2.1.1	INTRODUCCIÓN.....	4
2.1.2	ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	4
2.1.2.1	SISTEMA.....	4
2.1.2.2	SISTEMA DE LAZO ABIERTO.....	5
2.1.2.3	SISTEMA DE LAZO CERRADO .....	6
2.1.3	SISTEMAS DE CONTROL CONVENCIONAL.....	6
2.1.3.1	TEORÍA BÁSICA DEL CONTROL AUTOMÁTICO.....	7
2.1.3.2	ACCIONES DE CONTROL .....	9
2.1.3.2.1	CONTROL TODO-NADA CON HISTÉRESIS .....	9
2.1.3.2.2	CONTROL PROPORCIONAL .....	10
2.1.3.2.3	CONTROL INTEGRAL.....	11
2.1.3.2.4	CONTROL DERIVATIVO .....	12
2.1.3.2.5	CONTROL PROPORCIONAL+INTEGRAL+DERIVATIVO .....	13

2.1.4	CRITERIOS DE ESTABILIDAD DEL CONTROL.....	14
2.1.4.1	CRITERIO DE RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO .....	14
2.1.4.2	CRITERIO DEL ÁREA MÍNIMA.....	15
2.1.4.3	CRITERIO DE MÍNIMA PERTURBACIÓN .....	15
2.1.4.4	CRITERIO DE AMPLITUD MÍNIMA .....	15
2.1.5	MÉTODO DE AJUSTE DE CONTROLADORES PID .....	15
2.1.6	CONTROL POR COMPUTADOR.....	18
2.1.6.1	GENERALIDADES .....	18
2.1.6.2	SISTEMAS EXPERTOS.....	19
2.1.7	CONTROL POR LÓGICA DIFUSA.....	20
2.1.7.1	FUNCIONES DE PERTENENCIA O MEMBRESÍA.....	20
2.1.7.2	REPRESENTACIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS .....	21
2.1.7.3	OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS .....	23
2.1.8	DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO.....	25
2.1.8.1	FUZIFICACIÓN .....	26
2.1.8.2	REGLAS DE CONTROL Y MOTOR DE INFERENCIA .....	27
2.1.8.3	DEFUZIFICACIÓN .....	30
2.1.9	TIPOS DE CONTROLADORES DIFUSOS .....	31
2.1.9.1	MODELO DE MAMDANI .....	31
2.1.9.2	MODELO DE TAKAGI-SUGENO .....	31
2.1.9.3	MODELO DE TSUKAMOTO .....	32
2.1.10	CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DIFUSO .....	32
2.1.11	SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES DIFUSOS .....	33
3	CAPÍTULO 3.....	35
3.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODULO.....	35

3.1.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....	35
3.1.2	DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS.....	36
3.1.2.1	COMPONENTES MECÁNICOS.....	36
3.1.2.1.1	SOPORTE DE MADERA.....	36
3.1.2.1.2	SISTEMA HIDRÁULICO .....	37
3.1.2.2	COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS.....	38
3.1.2.2.1	SENSORES Y CONVERTIDOR DE SEÑAL.....	38
3.1.2.2.2	CONTROLADOR .....	38
3.1.2.2.3	PRE ACTUADORES .....	40
3.1.2.3	INTERFACES DE USUARIOS HMI.....	47
3.1.2.3.1	COMUNICACIONES MEDIANTE PROFINET IO.....	50
3.1.3	ESTÁNDARES Y NORMAS .....	53
3.1.4	DIAGRAMAS E INSTRUMENTACIÓN .....	54
4	CAPÍTULO 4.....	56
4.1	DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR.....	56
4.1.1	INTRODUCCIÓN.....	56
4.1.2	ANÁLISIS TEÓRICO .....	57
4.1.3	IMPLEMENTACIÓN .....	58
4.1.3.1	ANTECEDENTES .....	58
4.1.3.1.1	ERROR $e(t)$ .....	58
4.1.3.1.2	CAMBIO EN EL ERROR $d dte(t)$ .....	58
4.1.3.2	CONSECUENTES.....	60
4.1.3.3	REGLAS DE CONTROL .....	60



4.1.4	ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	61
4.1.4.1	SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	61
4.1.5	MODELADO MATEMÁTICO DEL CONTROLADOR PID.....	67
4.1.6	DETERMINACIÓN DE CONSTANTES $K_p$ $K_i$ $K_d$ .....	70
5	CAPÍTULO 5.....	74
5.1	SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	74
6	CAPÍTULO 6.....	83
6.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
6.1.1	CONCLUSIONES .....	83
6.1.2	RECOMENDACIONES.....	86
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
8	ANEXO I .....	89
9	DESCRIPCIÓN DE LA NORMA IEC 61131 .....	89
10	ANEXO II.....	95
11	MANUAL DE USUARIO .....	95
12	ANEXO III.....	105
13	PLANOS ELÉCTRICOS .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1.</b> SISTEMA DE LAZO ABIERTO.....	5
<b>FIGURA 2.2.</b> SISTEMA DE LAZO CERRADO .....	6
<b>FIGURA 2.3.</b> DIAGRAMA DE BLOQUE DE UN SISTEMA.....	7
<b>FIGURA 2.4.</b> DIAGRAMA DE BLOQUE DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO .....	8
<b>FIGURA 2.5.</b> DIAGRAMA DE BLOQUE DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LAZO RETROALIMENTADO.....	9
<b>FIGURA 2.6.</b> RESPUESTA <i>ON-OFF</i> CON BANDA DE HISTÉRESIS.....	10
<b>FIGURA 2.7.</b> ACCIÓN PROPORCIONAL.....	10
<b>FIGURA 2.8.</b> ACCIÓN DERIVATIVA .....	12
<b>FIGURA 2.9.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL PID PARALELO .....	13
<b>FIGURA 2.10.</b> CRITERIOS DE ESTABILIDAD .....	14
<b>FIGURA 2.11.</b> RESPUESTA A UNA ENTRADA TIPO ESCALÓN .....	17
<b>FIGURA 2.12.</b> PERIODO DE OSCILACIÓN .....	18
<b>FIGURA 2.13.</b> FUNCIÓN DE PERTENENCIA DIFUSA .....	21
<b>FIGURA 2.14.</b> FUNCIÓN DE PERTENENCIA TRAPEZOIDAL .....	22
<b>FIGURA 2.15.</b> FUNCIÓN DE PERTENENCIA TIPO PUNTUAL .....	23
<b>FIGURA 2.16.</b> DIAGRAMA DE FLUJO DE UN CONTROLADOR DIFUSO.....	25
<b>FIGURA 2.17.</b> ESTRUCTURA INTERNA DE UN CONTROLADOR DIFUSO.....	26
<b>FIGURA 2.18.</b> INTERFAZ DE FUZIFICACIÓN .....	27
<b>FIGURA 2.19.</b> BLOQUE DE MOTOR DE INFERENCIA.....	28
<b>FIGURA 2.20.</b> INTERFAZ DE DEFUZIFICACIÓN .....	30
<b>FIGURA 3.1</b> MÓDULO DE CONTROL DE NIVEL, IZQUIERDA PARA CONTROL PID, DERECHA PARA CONTROL DIFUSO .....	35
<b>FIGURA 3.2.</b> BOMBAS CENTRÍFUGAS Y TANQUE PRINCIPAL .....	37
<b>FIGURA 3.3.</b> PLC SIMATIC S7-1200 SIEMENS .....	39
<b>FIGURA 3.4.</b> CICLO DE PROGRAMA DE UN PLC.....	39
<b>FIGURA 3.5.</b> PROGRAMACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE TIA PORTAL DE SIEMENS .....	40
<b>FIGURA 3.6.</b> VARIADOR DE VELOCIDAD SINAMICS G110 DE SIEMENS .....	41

<b>FIGURA 3.7. REGULACIÓN ESCALAR .....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 3.8. SEÑAL SPWM DE UN INVERSOR DC/AC .....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 3.9. FORMA DE ONDA DISTORSIONADA POR UN VARIADOR DE FRECUENCIA .....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 3.10. DISTORSIÓN DE LA SEÑAL DE VOLTAJE POR TRANSIENTES .....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 3.11. SUPRESORES DE TRANSIENTES.....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 3.12. PANEL OPERADOR BÁSICO BOP .....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 3.13. MODIFICACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ALIMENTACIÓN DEL VARIADOR DE 50HZ A 60HZ.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 3.14. INTERFACES DE USUARIO SIEMENS .....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 3.15. PANEL TÁCTIL KTP600 PN SIEMENS .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 3.16. CONECTOR PROFINET .....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 3.17. SWITCH INDUSTRIAL ETHERNET S7-1200 .....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 3.18. CABLE Y CONECTOR PROFIBUS.....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 3.19. DIAGRAMA DE PROCESO E INSTRUMENTACIÓN P&amp;ID.....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 4.1. SISTEMA DE CONTROL DIFUSO .....</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 4.2. FUNCIONES DE PERTENENCIA DE LA VARIABLE “ERROR”.....</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 4.3. FUNCIONES DE PERTENENCIA DE LA VARIABLE “CAMBIO EN EL ERROR” .....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 4.4. FUNCIONES DE PERTENENCIA DE LA VARIABLE “VELOCIDAD”.....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 4.5. DEFINICIÓN DE VARIABLES .....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 4.6. VARIABLE DE ENTRADA “ERROR” .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 4.7. VARIABLE DE ENTRADA “CAMBIO EN EL ERROR” .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 4.8. VARIABLE DE SALIDA “VELOCIDAD”.....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 4.9. REGLAS DE INFERENCIA.....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 4.10. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE NIVEL .....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 4.11. SUPERFICIE DE CONTROL .....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 4.12. CURVA DE RELACIÓN “ERROR VS. VELOCIDAD” .....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 4.13. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL SISTEMA FÍSICO .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 4.14. RESPUESTA A UNA ENTRADA ESCALÓN <math>Y=PID(8,25,0,0.15)</math>.....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 4.15. RESPUESTA A UNA ENTRADA ESCALÓN <math>Y=PID(8,50,0,0.15)</math>.....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 4.16. RESPUESTA A UNA ENTRADA ESCALÓN <math>Y=PID(8,80,0,0.15)</math>.....</b>	<b>73</b>

<b>FIGURA 5.1.</b> SUPERFICIE DE CONTROL .....	76
<b>FIGURA 5.2.</b> TIEMPOS DE ESTABILIZACIÓN PARA UNA REFERENCIA DE 15 CM. ....	77
<b>FIGURA 5.3.</b> TIEMPOS DE ESTABILIZACIÓN PARA UNA REFERENCIA DE 18 CM. ....	79
<b>FIGURA 5.4.</b> ERROR EN ESTADO ESTABLE CONTROL PID VS. DIFUSO .....	78
<b>FIGURA 5.5.</b> SOBREPICO MÁXIMO EN CONTROL PID .....	80
<b>FIGURA 5.6.</b> PERTURBACIONES CONTROL PID VS. DIFUSO .....	81

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>ECUACIÓN 2.1.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA .....	7
<b>ECUACIÓN 2.2.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA COMO RAZÓN DE POLINOMIOS .....	8
<b>ECUACIÓN 2.3.</b> POLINOMIO CARACTERÍSTICO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA .....	8
<b>ECUACIÓN 2.4.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO .....	9
<b>ECUACIÓN 2.5.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA RETROALIMENTADO CON PERTURBACIONES .....	9
<b>ECUACIÓN 2.6.</b> ACCIÓN PROPORCIONAL .....	11
<b>ECUACIÓN 2.7.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA ACCIÓN PROPORCIONAL .....	11
<b>ECUACIÓN 2.8.</b> ACCIÓN INTEGRAL .....	11
<b>ECUACIÓN 2.9.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA ACCIÓN INTEGRAL .....	12
<b>ECUACIÓN 2.10.</b> ACCIÓN DERIVATIVA .....	12
<b>ECUACIÓN 2.11.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA ACCIÓN DERIVATIVA .....	12
<b>ECUACIÓN 2.12.</b> ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL+INTEGRAL+DERIVATIVA .....	13
<b>ECUACIÓN 2.13.</b> FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA ACCIÓN DE CONTROL PID .....	14
<b>ECUACIÓN 2.14.</b> DEFINICIÓN DE CONJUNTO DIFUSO .....	21
<b>ECUACIÓN 2.15.</b> EXPRESIÓN MATEMÁTICA PARA FUNCIÓN TRAPEZOIDAL .....	22
<b>ECUACIÓN 2.16.</b> EXPRESIÓN MATEMÁTICA FUNCIÓN TIPO PUNTUAL .....	23
<b>ECUACIÓN 2.17.</b> UNIÓN DE DOS CONJUNTOS DIFUSOS .....	24
<b>ECUACIÓN 2.18.</b> INTERSECCIÓN DE DOS CONJUNTOS DIFUSOS .....	24
<b>ECUACIÓN 2.19.</b> COMPLEMENTO DE UN CONJUNTO DIFUSO .....	24
<b>ECUACIÓN 2.20.</b> PRODUCTO CARTESIANO DE DOS CONJUNTOS DIFUSOS .....	25

<b>ECUACIÓN 2.21.</b> CO-PRODUCTO CARTESIANO DE DOS CONJUNTOS DIFUSOS.....	25
<b>ECUACIÓN 2.22.</b> VARIABLE LINGÜÍSTICA DE SALIDA DESPUÉS DE APLICAR INFERENCIA..	29
<b>ECUACIÓN 2.23.</b> CENTRO DE ÁREAS .....	30
<b>ECUACIÓN 2.24.</b> REGLAS DE IMPLICACIÓN PARA CONTROLADOR TIPO MANDANI .....	31
<b>ECUACIÓN 2.25.</b> REGLAS DE IMPLICACIÓN PARA CONTROLADOR TIPO TAKAGI-SUGENO ..	32
<b>ECUACIÓN 2.26.</b> REGLAS DE IMPLICACIÓN PARA CONTROLADOR TIPO TSUKAMOTO .....	32
<b>ECUACIÓN 4.1.</b> CÁLCULO DE VARIABLE LINGÜÍSTICA “ERROR” .....	58
<b>ECUACIÓN 4.2.</b> CÁLCULO DE LA VARIABLE LINGÜÍSTICA “CAMBIO EN EL ERROR” .....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 2.1.</b> PARÁMETROS SEGÚN EL PRIMER MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS .....	17
<b>TABLA 2.2.</b> PARÁMETROS SEGÚN EL SEGUNDO MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS .....	18
<b>TABLA 3.1.</b> DETALLE DE LOS SÍMBOLOS UTILIZADOS EN EL CONTROL DE NIVEL .....	55
<b>TABLA 4.1.</b> EFECTOS DEL INCREMENTO DE LAS CONSTANTES DE UN CONTROLADOR PID EN UN BUCLE CERRADO.....	70
<b>TABLA 4.2.</b> VALORES REALES DEL SISTEMA .....	71
<b>TABLA 4.3.</b> PARÁMETROS OBTENIDOS PARA SINTONIZACIÓN DEL LAZO DE CONTROL PID	73
<b>TABLA 5.1.</b> PARÁMETROS PARA SINTONIZACIÓN FINAL DEL LAZO DE CONTROL PID .....	75

## RESUMEN

Para poder realizar una comparación cuantitativa y cualitativa entre un control convencional PID y un control experto difuso, se seleccionó un sistema de nivel con descarga gravitatoria, sistema hidráulico sobre el cual se aplica la teoría de control convencional que empieza por el desarrollo y análisis del modelo matemático, que registra la presencia de flujo turbulento y la característica de no ser un sistema lineal, por lo cual se necesita asumir condiciones ideales para linealizarlo y poder ser utilizado en el control PID, seguidamente se describen las diferentes fases de la metodología utilizada, además de mencionar las herramientas de diseño asistido por computadora en las fases que lo requieren. El desarrollo de un controlador difuso para esta misma aplicación de nivel cuenta con dos entradas como son el error sobre la referencia y un cambio en el error y la salida como acción sobre un actuador, las mismas que cumplen reglas de control basadas en la experiencia humana para lograr llevarlo a un algoritmo de control que estabilice el sistema. El paso siguiente es la implementación de un prototipo de sistema de nivel con la ayuda de un PLC, el mismo que contiene una función integrada para control PID y en él se desarrolla también el algoritmo para control difuso escrito en un lenguaje de bajo nivel, todo esto bajo la norma IEC 61131-3 utilizada para la estandarización de los autómatas programables y sus periféricos, los resultados obtenidos son visualizados a través de una interface HMI programada. A continuación se describen los pasos necesarios para una correcta sintonización del sistema con el objetivo de lograr un sistema robusto para ambos tipos de control y poder comparar sus características, esta comparación da como resultados que el control difuso reduce significativamente los sobrepicos y el error en estado estable y provee una respuesta satisfactoria, rápida y estable para el sistema desarrollado cuando es sometido a diferentes tipos de perturbaciones, además de demostrar que con la utilización de un PLC gama media es posible realizar sistemas de control avanzado, reduciendo notablemente los costos de implementación para esta tesis, puesto que para implementar lógica difusa normalmente se usan PLC de gama alta que resultan ser muy costosos.

## PRESENTACIÓN

La tesis que se ha desarrollado es una demostración de dos tipos de controles automáticos mediante PLC (Controlador Lógico Controlable), el control difuso y PID (Proporcional, Integral y Derivativo), mediante los cuales se controla el nivel, y se compara la respuesta de dos tanques. Para la visualización de parámetros de referencia y valor actual se tiene un panel táctil HMI (Interfaz Humano Máquina).

Como actuadores se usan bombas independientes de idénticas características para cada tanque, los cuales son accionados mediante variadores de velocidad, los mismos sirven para variar el caudal de cada bomba y así disminuir o incrementar el nivel de cada tanque según la necesidad. Como sensor de nivel se tienen dos sensores de nivel tipo potenciómetro, el cuál mediante un acondicionador varía el voltaje proporcionalmente al nivel de cada tanque obteniendo la realimentación necesaria para cada controlador.

En el desarrollo de la tesis se tiene en el Capítulo 1: Introducción, Capítulo 2: Marco Teórico, Capítulo 3: Diseño y Construcción del Módulo, Capítulo 4: Desarrollo e Implementación del Controlador, Capítulo 5: Síntesis y Evaluación de Resultados, y finalmente, Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones.

En procesos estándares tales como el control de nivel implementado en esta tesis, se muestra que el que el control difuso reduce mejor los sobrepicos y el error en estado estable y provee una respuesta satisfactoria, rápida y estable para el sistema desarrollado cuando es sometido a diferentes tipos de perturbaciones respecto al control PID, debido a su mayor necesidad de algoritmos matemáticos que incrementan considerablemente el tiempo de respuesta, y por ende el error ante perturbaciones.

# CAPÍTULO 1

## 1.1 INTRODUCCIÓN

### 1.1.1 ANTECEDENTES

Cuando un sistema complejo físicamente no entrega un modelo matemático preciso y en particular cuando la descripción del sistema requiere de cierta experiencia, la metodología del control difuso tiene características sobresalientes y méritos sobre muchas otras técnicas. La utilización de conocimiento humano en el diseño de controladores no sólo representa una ventaja sino que es a menudo necesaria.

### 1.1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El uso de técnicas de control convencional como es el control PID en algunos casos resulta ser una buena alternativa para controlar sistemas industriales dinámicos; ya que proporcionan tiempos de respuesta razonables, sin embargo entre mayor es la precisión requerida en el sistema el ajuste de este tipo de control es más difícil ya que son bastante sensibles a las señales de ruido y en ocasiones introducen oscilaciones cuando se presentan retardos en el sistema.

Adicionalmente existen procesos que deben ser controlados en tiempo real para los cuales el lazo de retroalimentación de un control PID resulta ser muy lento. Cuando la dinámica de los sistemas o procesos a controlar es no lineal, el control tiene que tener la capacidad de compensar esta no-linealidad y ya que el control PID asume relaciones lineales, este no tiene la capacidad para responder a este tipo de sistemas en una manera fina. Desde los años 80 los sistemas inteligentes difusos van desplazando a estas tecnologías convencionales en muchas aplicaciones científicas y sistemas de ingeniería, especialmente en los sistemas de control y el reconocimiento de patrones. La implementación de controladores basados en lógica difusa es motivada por su característica de capturar estrategias cualitativas de control y su capacidad de implementar un comportamiento de control altamente flexible. Es por estas razones importante realizar una



comparación profunda entre estos dos tipos de control y establecer las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. La tesis se basa en una aplicación de control de nivel y se generaliza para aplicaciones industriales diversas, lo que redundará en la optimización y mejora de la productividad de procesos productivos en la industria ecuatoriana.

### **1.1.3 HIPÓTESIS**

Demostrar como el rendimiento de un control PID puede ser igualado y excedido por un control difuso en aplicaciones industriales que requieren precisión y estabilidad.

### **1.1.4 OBJETIVOS**

Caracterizar los lazos de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Determinar las características de los controladores inteligentes difusos (*Fuzzy*).

Comparar el desempeño de los controladores PID respecto a los controladores difusos, utilizando para ello una aplicación industrial de control de nivel.

Evaluar el desempeño de los controladores PID y controladores fuzzy para aplicaciones industriales.

### **1.1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

En este proyecto se presenta la evaluación y análisis de dos diferentes tipos de controladores aplicados a la regulación de nivel de líquido en un tanque, al cual se puede aplicar distintas perturbaciones o cambios de carga.

Cada tanque se alimenta de agua por medio de una bomba, a esta se le considera el elemento final de control (actuador) que mantiene el nivel en la referencia deseada por el usuario. Para realizar este trabajo se construyó un

sistema de control basado en un PLC (Controlador Lógico Programable) el cual permite aplicar un control convencional PID y a la vez implementar un algoritmo para un controlador difuso.

El primer controlador analizado es el controlador PID que es extensamente utilizado en la industria. Para que este controlador funcione de una forma adecuada se tienen que sintonizar las ganancias proporcional, integral y derivativa.

El segundo controlador es un controlador difuso o inteligente, que realiza el control del nivel de líquido en el tanque por medio de una serie de reglas y una máquina de inferencia, y se toman decisiones que normalmente aplicaría un experto humano. El control se realiza reduciendo el error entre la referencia deseada y la salida del sistema.

Los resultados obtenidos son mostrados directamente al investigador en una pantalla táctil incorporada al módulo desarrollado para esta tesis.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mercado exige mayor calidad en las piezas fabricadas, lo que ha conducido al desarrollo de diferentes teorías para explicar el funcionamiento de los procesos, en este capítulo se define el control automático de procesos como una manera de mantener la variable controlada en el punto de control a pesar de las perturbaciones. En este punto cabe señalar algunas de las principales razones por las cuales se implementa un lazo de control en una planta:

- Hacer una planta más segura para las personas.
- Incrementar la productividad de la planta.
- Proteger el equipo de la planta.

Además se debe tener en cuenta que cuando la complejidad de un sistema de control se incrementa, también lo hacen los costos del diseño inicial de la instalación, entrenamiento de los operadores y mantenimiento, por lo tanto en el diseño de sistemas de control es importante tener disponibles varias opciones y seleccionar un sistema que provea un balance entre su complejidad, costo y beneficios recibidos.

#### 2.1.2 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE CONTROL

##### 2.1.2.1 SISTEMA<sup>1</sup>

Sistema es un conjunto de componentes que trabajan juntos para alcanzar un objetivo determinado. Los parámetros funcionales del sistema desde el punto de vista del control son los siguientes:

**Variable controlada<sup>2</sup>.** Es la cantidad o condición que se mide y controla. Por lo común, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema.

---

<sup>1</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 2)

<sup>2</sup> (OGATA, 1998, p. 2)

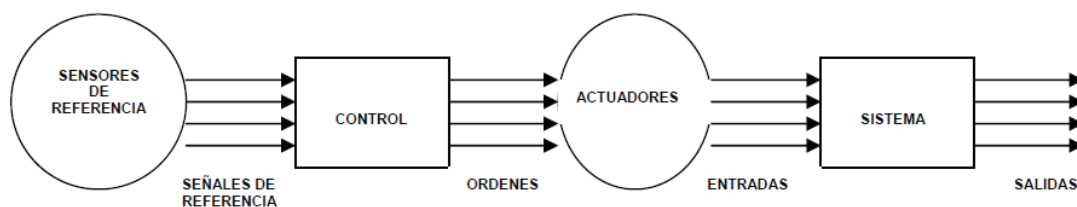
**Variable manipulada**<sup>3</sup> o entrada. Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.

**Perturbaciones**<sup>4</sup>. Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

**El proceso**<sup>5</sup> o planta. Es el objeto físico que va a ser controlado, el primer paso es el diseño efectivo de un sistema de control, es entender el proceso que está siendo controlado.

### 2.1.2.2 SISTEMA DE LAZO ABIERTO

La forma más simple de un proceso de control se conoce como un lazo abierto. Un lazo abierto de control significa que no hay medición de la variable controlada y no se puede compensar automáticamente la variable manipulada. En cualquier sistema de control de lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija, como resultado, la precisión del sistema depende de su calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control de lazo abierto no realiza la tarea deseada. A pesar de estas limitaciones, un sistema de control de lazo abierto puede trabajar satisfactoriamente en una amplia variedad de aplicaciones, así como son de bajo costo y simplicidad.



**Figura 2.1.** Sistema de lazo abierto<sup>6</sup>

<sup>3</sup> (OGATA, 1998, p. 2)

<sup>4</sup> (OGATA, 1998, p. 3)

<sup>5</sup> (OGATA, 1998, p. 2)

### 2.1.2.3 SISTEMA DE LAZO CERRADO

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error, que es la diferencia entre la señal de entrada y la salida de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales) a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente, tal como se observa en la figura 2.2. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentando para reducir el error del sistema.<sup>7</sup>

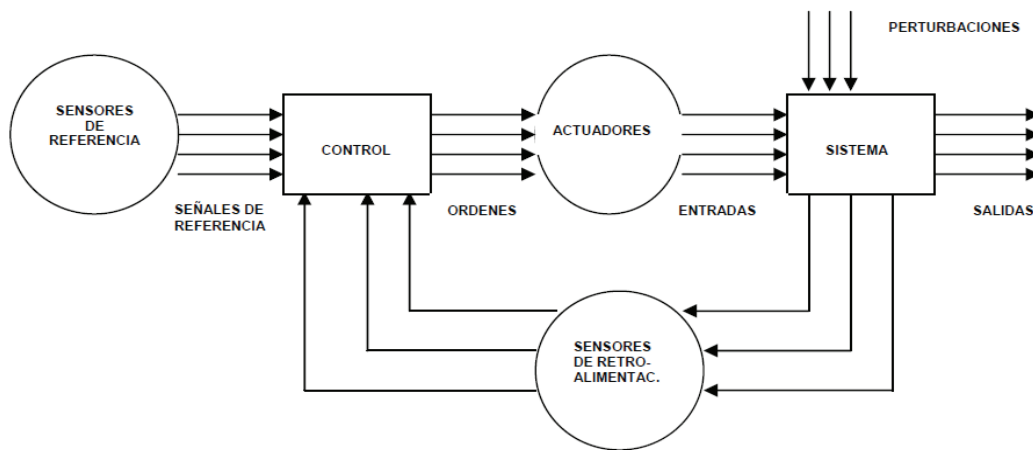


Figura 2.2. Sistema de lazo cerrado<sup>8</sup>

### 2.1.3 SISTEMAS DE CONTROL CONVENCIONAL

El sistema físico que se debe controlar puede ser del tipo eléctrico, térmico, hidráulico, neumático, gaseoso, mecánico, o cualquier otro. El comportamiento del proceso en el tiempo define sus características dinámicas; si no interviene el tiempo sólo quedan determinadas las características estáticas. Los dos tipos de respuestas, estáticas (permanentes) y dinámicas (variables en el tiempo) deben ser consideradas en la operación de un sistema de control.

<sup>6</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 3)

<sup>7</sup> (OGATA, 1998, p. 7)

<sup>8</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 3)

El control convencional provee numerosos métodos para construir controladores para sistemas dinámicos, entre los principales se señalan:

- Control (PID) Proporcional-integral-derivativo.
- Control Clásico
- Control en el Espacio de Estado
- Control Robusto
- Métodos No lineales
- Control Adaptativo
- Entre otros

### 2.1.3.1 TEORÍA BÁSICA DEL CONTROL AUTOMÁTICO<sup>9</sup>

Para comprender adecuadamente las relaciones entre las variables involucradas en la teoría de control, se han de revisar primero algunas relaciones importantes.

Se define como función de transferencia de un sistema lineal, sea esta una planta, un controlador u otro, al cociente de la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada, considerando las condiciones iniciales como nulas.



**Figura 2.3.** Diagrama de bloque de un sistema<sup>10</sup>

$$H(s) = \frac{\mathcal{L}[y(t)]}{\mathcal{L}[x(t)]} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad [2.1]$$

$H(s)$  también se puede escribir como una razón de polinomios en 's', siendo 's' la variable de frecuencia compleja  $s=j\omega+\sigma$ .

---

<sup>9</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 6)

<sup>10</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 6)

<sup>11</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 6)

$$H(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{j=0}^n a_j s^j} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad [2.2]$$

Las características de  $H(s)$  dependen sólo de las propiedades de los componentes del sistema reflejados en los coeficientes de la ecuación. Para los sistemas causales  $n > m$  el denominador  $D(s)$  es llamado polinomio característico:

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots \dots a_{n-1} s + a_0 = 0 \quad [2.3]$$

Se le denomina ecuación característica del sistema. Su importancia radica en que sus raíces determinan la estabilidad del mismo además de determinar el comportamiento dinámico del sistema. Se dice que si las raíces de la ecuación característica tienen parte real negativa, el sistema será estable.

Antes de entrar en el tema de estabilidad se identifican las dos formas básicas de controlar un proceso: lazo abierto y lazo cerrado. El primero de ellos presenta la ventaja de que es de fácil construcción y mantenimiento, pero tienen las desventajas de que es muy sensible a perturbaciones externas y de que exige continuas calibraciones, ya que no es un método automático. Este sistema tiene la forma:



**Figura 2.4.** Diagrama de bloque de un sistema de control de lazo abierto<sup>14</sup>

Si se denotan las funciones de transferencia del controlador y la planta (proceso) como  $G_c(s)$  y  $G_p(s)$  respectivamente, la función de transferencia del sistema es:

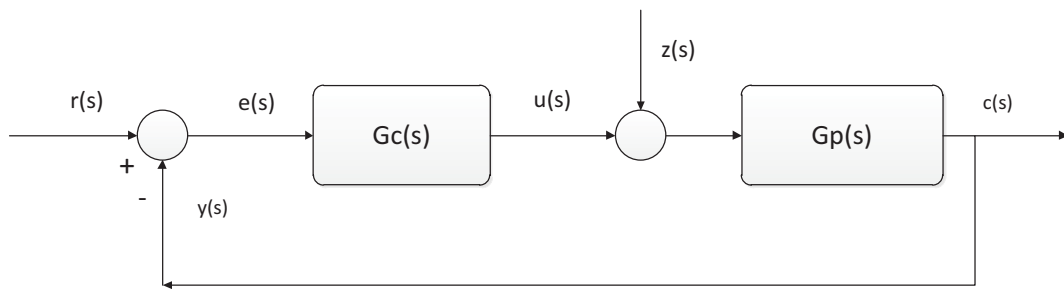
<sup>12</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 6)

<sup>13</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 6)

<sup>14</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 7)

$$H(s) = Gc(s) \cdot Gp(s) \quad [2.4]$$

El segundo de ellos, el de lazo cerrado, utiliza la señal de salida para auto-calibrarse continuamente. Además es bastante menos sensible a las perturbaciones externas. Su desventaja es que es más complejo de instalar y que puede provocar inestabilidad si no se sintoniza adecuadamente.



**Figura 2.5.** Diagrama de bloque de un sistema de control de lazo retroalimentado<sup>16</sup>

La función de transferencia completa del sistema es:

$$y(s) = \frac{Gc(s) \cdot Gp(s)}{1 + Gc(s) \cdot Gp(s)} r(s) + \frac{Gp(s)}{1 + Gc(s) \cdot Gp(s)} z(s) \quad [2.5]$$

### 2.1.3.2 ACCIONES DE CONTROL

#### 2.1.3.2.1 CONTROL TODO-NADA CON HISTÉRESIS

Es la acción más sencilla ya que consiste en un pulsador que generalmente solo prende o apaga un actuador. Es decir permanece en un valor máximo o mínimo dependiendo de la información de retroalimentación. Debido a que la respuesta siempre está encendiendo y apagando o abriendo y cerrando, normalmente esta acción de control se utiliza en procesos donde el punto de operación es un rango

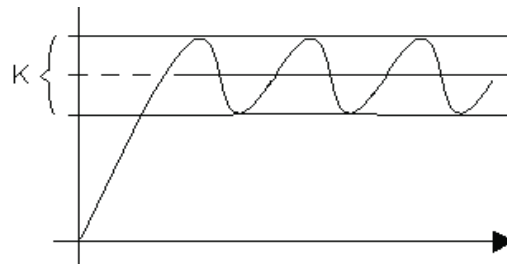
<sup>15</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 7)

<sup>16</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 7)

<sup>17</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 7)



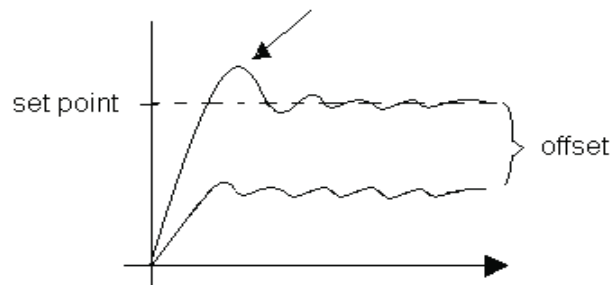
que se puede controlar agregándole una banda de histéresis como se muestra en la figura 2.6.



**Figura 2.6.** Respuesta *on-off* con banda de histéresis

### 2.1.3.2.2 CONTROL PROPORCIONAL

Este tipo de acción de control trata de encontrar el valor de una constante denominada ganancia proporcional, que permite cumplir con el requerimiento del tiempo de subida. Es decir este tipo de control se asemeja a un amplificador (cuya constante puede ser cambiada según el requerimiento). La acción proporcional responde solamente al cambio en el error.



**Figura 2.7.** Acción proporcional

La acción de control Proporcional P se define en la ecuación como el resultado de multiplicar el valor del error por una ganancia proporcional  $K_p$ , y que define cual es el ajuste del elemento final de control de acuerdo a la desviación existente en la variable de proceso.

$$u(t) = Kp \cdot e(t) \quad [2.6]$$

Y su función de transferencia es:

$$Kp = \frac{U(s)}{E(s)} \quad [2.7]$$

Como se puede observar en la figura 2.7 esta acción de control no puede eliminar el error en estado estacionario, además de que conforme sea mayor la ganancia proporcional el sistema responderá más rápidamente pero se tiene un mayor sobre pico y el sistema tiende a la inestabilidad.

### 2.1.3.2.3 CONTROL INTEGRAL

Mediante este control, es posible reducir el error en estado estacionario al introducir en la acción de control una constante  $K_i$ . Este tipo de control es integral, ya que el valor de la salida del controlador varía en relación proporcional con la señal del error.

La ganancia de integración  $K_i$  en los controladores suele conocerse como una velocidad de respuesta en el control integral, por lo que se utiliza un tiempo de integración y está dado por repeticiones por minuto.

La fórmula del integral está dada por:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t) \quad [2.8]$$

Y su función de transferencia es:

---

<sup>18</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 11)

<sup>19</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 11)

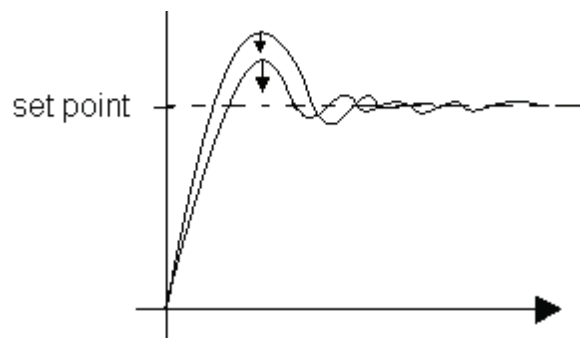
<sup>20</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 12)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{Ki}{s}$$

[2.9]

#### 2.1.3.2.4 CONTROL DERIVATIVO

Gracias al control derivativo es posible controlar los sobre picos, es decir se puede regular el máximo valor que puede llegar a tener un sobre pico. En el control derivativo, el error se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante  $K_d$ , como se define en la ecuación 2.10. La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la velocidad misma que se produce, de esta manera evita que el error se incremente, por lo tanto una mayor derivativa corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordeamente dándole mayor estabilidad a la respuesta del sistema como se muestra en la Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Acción derivativa

La fórmula del control derivativo está dada por:

$$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad [2.10]$$

Y su función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d \cdot s \quad [2.11]$$

<sup>21</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 12)

<sup>22</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 12)

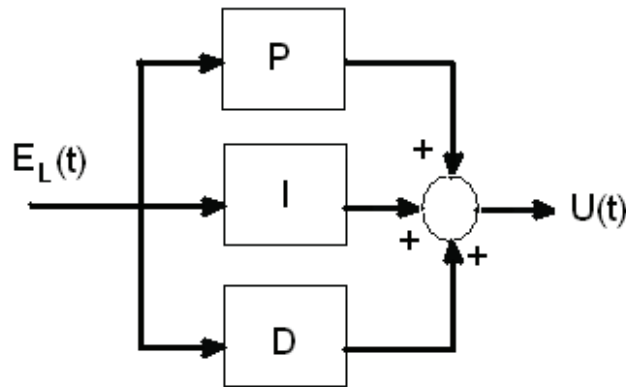
La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; por lo que si el error es constante la acción derivativa no actúa.

Debido a que sólo actúa en los transitorios e incrementa las señales de ruido, esta acción nunca se puede utilizar sola.

### 2.1.3.2.5 CONTROL PROPORCIONAL+INTEGRAL+DERIVATIVO

Como su nombre lo indica, este tipo de control combina las acciones: proporcional, integral y derivativa; por lo tanto puede controlar el tiempo de subida, sobre picos y error al mismo tiempo, siempre y cuando se logren sintonizar adecuadamente las constantes:

El tipo de acción PID más empleada es PID en paralelo, donde cada acción de control es independiente. En el control PID la salida de los tres términos, el proporcional, el integral, y el derivativo son sumados para calcular la salida del controlador PID que se muestra en la figura 2.9.



**Figura 2.9.** Diagrama de bloques control PID paralelo

Definiendo  $U(t)$  en la ecuación 2.12 como la salida del controlador, la forma final del algoritmo del PID es:

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad [2.12]$$

<sup>23</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 12)

<sup>24</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 24)

Y su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = Kp + Kd \cdot s + \frac{Ki}{s} \quad [2.13]$$

#### 2.1.4 CRITERIOS DE ESTABILIDAD DEL CONTROL<sup>26</sup>

La estabilidad del control es la característica del sistema que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación.

Los criterios deseables para la estabilidad son los siguientes:

- Criterio de razón de amortiguamiento
- Criterio de área mínima
- Criterio de mínima perturbación
- Criterio de amplitud mínima

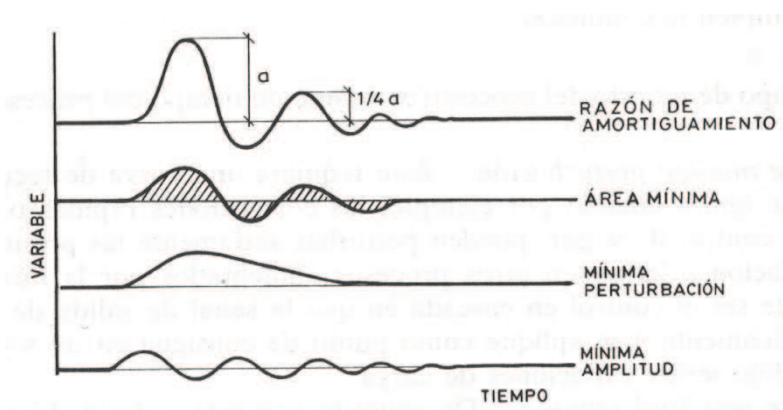


Figura 2.10. Criterios de estabilidad<sup>27</sup>

##### 2.1.4.1 CRITERIO DE RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO

La amortiguación de la respuesta es tal que la relación de amplitud entre las crestas de los dos primeros ciclos sucesivos es 0.25, es decir, que cada onda equivale a una cuarta parte de la anterior. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a

<sup>25</sup> (AGUINAGA, 2006, p. 13)

<sup>26</sup> (CREUS, 1998, pp. 523,524)

<sup>27</sup> (CREUS, 1998, p. 523)

un valor estable, entonces, una relación mayor que  $\frac{1}{4}$  da mayor estabilidad pero se prolonga el tiempo de normalización de la variable, mientras que una relación menor que  $\frac{1}{4}$  devuelve la variable más rápidamente al punto de consigna o a un valor estable pero perjudica la estabilidad del sistema. Este criterio es el más importante y se aplica especialmente en los procesos donde la duración de la desviación es tan importante como el valor de la misma.

#### **2.1.4.2 CRITERIO DEL ÁREA MÍNIMA**

Este criterio indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo más corto. Es decir, la expresión  $\int_0^t |e| dt$  en la que  $|e|$  es el valor absoluto de la desviación, debe tener el valor mínimo. Se denomina también criterio de la integral mínima del valor absoluto del error.

#### **2.1.4.3 CRITERIO DE MÍNIMA PERTURBACIÓN**

Este requiere una curva de recuperaciones no cíclicas, y se aplica cuando por ejemplo, las correcciones rápidas o cíclicas de una válvula de control de vapor pueden perturbar seriamente las presiones de vapor de alimentación e influir en otros procesos alimentados por la misma fuente.

#### **2.1.4.4 CRITERIO DE AMPLITUD MÍNIMA**

De acuerdo con este criterio, la amplitud de la desviación debe ser mínima, lo cual se aplica especialmente a procesos en que el producto o el equipo puede ser dañado por desviaciones momentáneamente excesivas, y en este caso la desviación es más importante que su duración.

### **2.1.5 MÉTODO DE AJUSTE DE CONTROLADORES PID**

Cuando se pone en marcha una planta tiene lugar normalmente un primer ajuste de los controladores, es decir la fijación de los valores de las acciones PID.

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir, para que la banda proporcional (ganancia), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) del controlador, en caso que posea las tres acciones, se acoplen adecuadamente con

el resto de los elementos del bucle de control. Este acoplamiento debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación que satisfaga los criterios de estabilidad.

Para que este acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado. Existen dos métodos fundamentales para determinar estas características, el método analítico y experimental.

El método analítico se basa en determinar el modelo o ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es generalmente difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y se incorpora a los controladores digitales y al control distribuido, que disponen de la potencia de cálculo adecuada en la determinación de la identificación del proceso y de los parámetros del modelo.

En el método experimental, las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o una serie de medidas realizadas en el proceso real.

Entre los principales métodos experimentales y más utilizados en la sintonización de los lazos de control se tienen los siguientes:

a) Primer método de Ziegler-Nichols<sup>28</sup>

En este método de lazo abierto, el procedimiento consiste en abrir el bucle cerrado de regulación antes del actuador, es decir operar el actuador en forma manual y crear un pequeño y rápido cambio en escalón en el proceso de entrada. La respuesta obtenida se representa en un gráfico, en el cual el punto de inflexión de la curva obtenida se traza una tangente lo más aproximada posible y se miden los valores R y L.

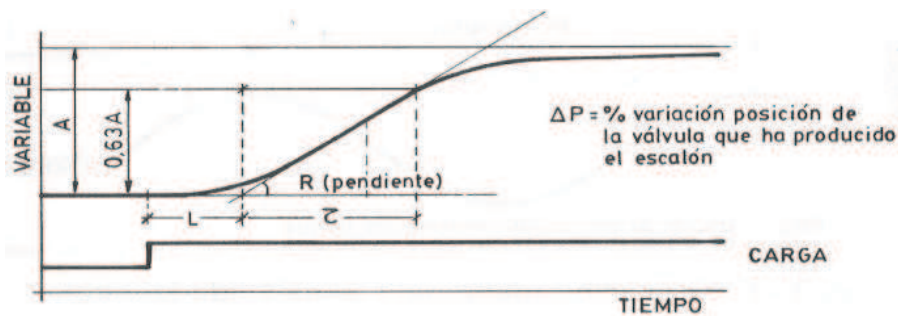
R es la pendiente de la tangente en el punto de inflexión de la curva

L es el tiempo de retardo del proceso, medido en minutos que transcurre entre el instante del cambio en escalón y el punto en que la tangente cruza el valor inicial de la variable controlada.

---

<sup>28</sup> (CREUS, 1998, pp. 529,530)

$\Delta P$  es el % de variación de posición del actuador que introduce el escalón en el proceso.



**Figura 2.11.** Respuesta a una entrada tipo escalón<sup>29</sup>

**Tabla 2.1.** Parámetros según el primer método de Ziegler-Nichols<sup>30</sup>

Controlador	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	$\% BP = \frac{100 RL}{\Delta P}$	0	0
PI	$\% BP = \frac{110 RL}{\Delta P}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$\% BP = \frac{83 RL}{\Delta P}$	$\frac{L}{0,5}$	0,5L

b) Segundo método de Ziegler-Nichols:<sup>31</sup>

Este método de lazo cerrado permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del bucle cerrado de control. El método se basa en estrechar gradualmente la banda proporcional con los ajustes de integral y derivada en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo.

Esta banda proporcional se denomina “banda proporcional límite” (PBU). Se anota el periodo del ciclo de las oscilaciones  $P_u$  en minutos, y la última banda proporcional  $P_{Bu}$ . Los ajustes de control que producen aproximadamente una

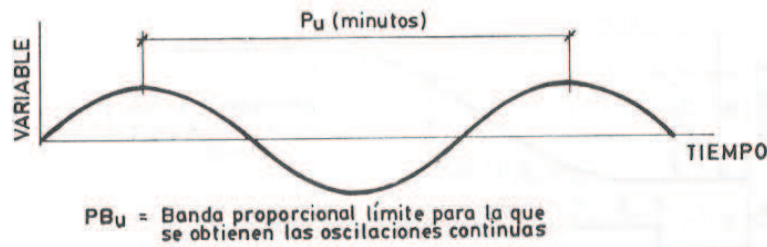
<sup>29</sup> (CREUS, 1998, p. 530)

<sup>30</sup> (CREUS, 1998, p. 530)

<sup>31</sup> (CREUS, 1998, pp. 528,529)



respuesta con una relación de amplitud 0.25, se calculan como muestra la tabla 2.2.



**Figura 2.12.** Período de oscilación<sup>32</sup>

**Tabla 2.2.** Parámetros según el segundo método de Ziegler-Nichols<sup>33</sup>

Controlador	Kp	Ki	Kd
P	$\% BP = 2 PBu$	0	0
PI	$\% BP = 2,2PBu$	$\frac{Pu}{1,2}$	0
PID	$\% BP = 1,7PBu$	$\frac{Pu}{2}$	$\frac{Pu}{8}$

En el método experimental, las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o de una serie de medidas realizadas en el proceso real.

## 2.1.6 CONTROL POR COMPUTADOR<sup>34</sup>

### 2.1.6.1 GENERALIDADES

Hoy en día, con el aumento del tamaño del proceso y el crecimiento de su complejidad, llega a ser necesario obtener su óptimo control para conseguir una marcha perfecta de la planta y lograr los beneficios adicionales que ello conlleva. Si bien existen dos tipos de computadores, analógico y digital, es más ventajoso emplear el segundo para los procesos industriales debido a las ventajas que

<sup>32</sup> (CREUS, 1998, p. 529)

<sup>33</sup> (CREUS, 1998, p. 529)

<sup>34</sup> (CREUS, 1998, p. 563)

presenta tratar exclusivamente con números puros y ser ideal para la solución de problemas numéricos. Asimismo la alta velocidad conseguida en las señales de mando a los actuadores permite realizar el control en forma prácticamente continua. Frente al análogo, el digital tiene la desventaja de que al muestrear el proceso pierde parte de la información, pero las ventajas que representa en la fácil modificación de parámetros y variables y en su versatilidad, hacen que sea ampliamente utilizado.

#### **2.1.6.2 SISTEMAS EXPERTOS<sup>35</sup>**

Los sistemas expertos emulan la capacidad de toma de decisiones de un experto humano en el dominio de un tema dado. La diferencia fundamental con relación al software convencional es que el programa (razonamiento, inferencia y mecanismo de control) está separado deliberadamente de los datos (conocimiento) con que trabaja.

El sistema experto se integra en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección de fallos y en la solución de los casos en que el proceso sale fuera de control.

Los sistemas expertos han sido posibles gracias al microprocesador. El sistema experto detecta y diagnostica los problemas potenciales que pueden presentarse en el control de procesos de la planta industrial. La elaboración del paquete experto es laboriosa. Es necesario adquirir el conocimiento que del proceso disponen los operadores de la planta y los ingenieros proyectistas, para incorporarlo al sistema experto. Este conocimiento se basa fundamentalmente en las señales de alarma que el operador humano capta antes de presentarse las situaciones anómalas del proceso, que dan lugar a toda clase de fenómenos perjudiciales como son: paro de la planta, destrucción del proceso, explosiones, etc. Para la elaboración de las bases del conocimiento se hace un uso amplio de pantallas y menús que permiten al usuario, sin tener experiencia en sistemas expertos, y con la ayuda de programas construir modelos del proceso, entrar los

---

<sup>35</sup> (CREUS, 1998, p. 580)

parámetros del sistema, especificar las variables críticas y otros datos del conocimiento.

El sistema experto también incorpora las operaciones necesarias para solucionar correctamente las situaciones anómalas del proceso.

### **2.1.7 CONTROL POR LÓGICA DIFUSA**

Los controladores difusos son las aplicaciones más importantes de la teoría borrosa, desarrollada por Zadeh en 1965 y es adecuada para control de procesos no lineales y con un comportamiento variable en el tiempo. El conocimiento experto se usa en vez de ecuaciones diferenciales para describir un sistema. Este conocimiento se puede expresar de una manera muy natural, empleando las variables lingüísticas que son descritas mediante conjuntos difusos.

**Variable lingüística**<sup>36</sup>: Por variable lingüística se entiende una variable cuyos valores o dominio de definición son palabras u oraciones (términos de carácter lingüístico) en lenguaje natural. Contiene, entre otras cosas, una colección de atributos que puede adquirir la variable, y cada atributo está representado por un conjunto difuso. Estos atributos reciben el nombre de valores lingüísticos. Para estas variables lingüísticas se utiliza un nombre y un valor lingüístico sobre un universo. Además, se puede dar lugar a sentencias generadas por reglas sintácticas, a las que se les puede dar un significado mediante distintas reglas semánticas. Por ejemplo, la velocidad de un coche, es una variable lingüística si sus valores son: alto, no alto, bajo, no bajo, muy bajo, y así sucesivamente.

#### **2.1.7.1 FUNCIONES DE PERTENENCIA O MEMBRESÍA**

De manera intuitiva se tiene el concepto de conjunto como una colección bien definida de elementos, en la que es posible determinar para un objeto cualquiera, en un universo dado, si acaso éste pertenece o no al conjunto. La decisión, naturalmente, es sí pertenece, o bien no pertenece.

Sea  $X$  una colección de objetos denotados generalmente por  $x$ , entonces un conjunto difuso  $A$  en  $X$  es un conjunto de pares ordenados:

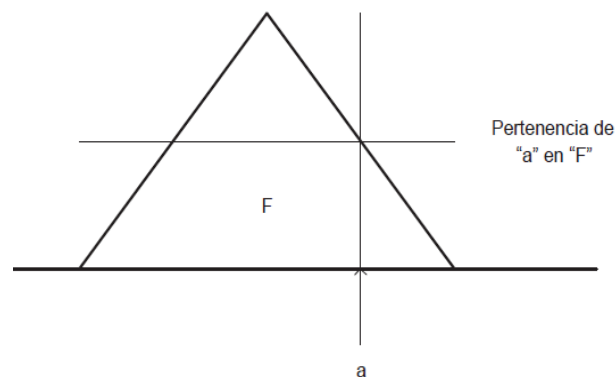
---

<sup>36</sup> (ALCÁNTARA, 2007, pp. 22,23)

$$A = \{(x, \mu(x)) | x \in X\}$$

[2.14]

El grado de pertenencia de un elemento a un conjunto se determina por una función de pertenencia, que puede tomar todos los valores reales comprendidos en el intervalo [0; 1]. La representación de la función de pertenencia de un elemento a un conjunto difuso se representa en la figura 2.13.



**Figura 2.13.** Función de pertenencia difusa

### 2.1.7.2 REPRESENTACIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS

Un conjunto difuso puede ser descrito enumerando el conjunto de pares ordenados  $(x, \mu(x))$  o expresando analíticamente la expresión que rige la función de pertenencia. Las funciones de pertenencias más usadas para representar los conjuntos difusos son las siguientes:

- Trapezoidales
- Saturadas a la derecha
- Saturadas a la izquierda
- Curva S
- Curva Z
- Curva PI
- Campana de Gauss
- Puntual (singleton)

<sup>37</sup> (ALVAREZ LOPEZ, 2006, p. 23)

## FUNCIONES DE TIPO TRAPEZOIDAL

Este tipo de funciones de pertenencia son muy empleadas en los controladores difusos por ser lineales y ofrecer mayor velocidad de cómputo. De manera general representan criterios lingüísticos tales como: “alrededor de...”, “aproximadamente entre b y c” representan intervalos difusos o números difusos.

Este tipo de función de pertenencia encierra como caso particular las funciones de pertenencia triangulares. Para el caso en que los puntos c y d, figura 2.14 coincidan se considera una función de tipo triangular.

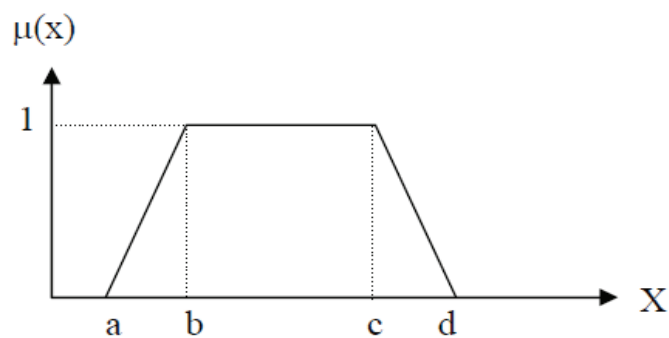


Figura 2.14. Función de pertenencia trapezoidal<sup>38</sup>

La expresión matemática que rige la función anterior es:

$$\mu_T(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ mD \cdot (x - d) & \text{si } c < x < d \\ mI \cdot (x - a) & \text{si } a < x < b \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde:

$$mD = \frac{1}{c-d}, \quad mI = \frac{1}{b-a} \quad [2.15]$$

<sup>38</sup> (ALVAREZ LOPEZ, 2006, p. 45)

## FUNCIÓN DE TIPO PUNTUAL

También denominadas con frecuencia “singletons”, en la que existe pertenencia sólo en un punto e igual a 1. La figura 2.15 muestra una función de pertenencia de tipo puntual.

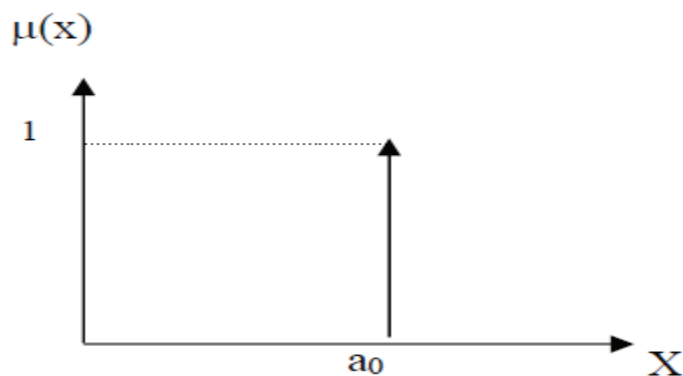


Figura 2.15. Función de pertenencia tipo puntual<sup>39</sup>

La expresión matemática de este tipo de funciones de pertenencia es la siguiente:

$$\mu_p(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = a_0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad [2.16]$$

### 2.1.7.3 OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS<sup>41</sup>

Dados dos conjuntos difusos A y B,<sup>42</sup>

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$$

$$B = \{(x, \mu_B(x)) | x \in X\}$$

<sup>39</sup> (ALVAREZ LOPEZ, 2006, p. 50)

<sup>40</sup> (ALVAREZ LOPEZ, 2006, p. 40)

<sup>41</sup> (KEVIN M. PAZINO, 1998)

<sup>42</sup> (ALVAREZ LOPEZ, 2006, p. 45)

**Unión:** La unión de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso C, que se escribe como  $C = A \cup B$  o  $C = A \cup B$ , cuya función de membresía está relacionada con las de A y B por

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad [2.17]$$

Como fue resaltado por Zadeh, una definición más intuitiva pero equivalente de la unión es la del conjunto difuso más pequeño que contiene ambos A y B. De forma alterna, si D es cualquier conjunto difuso que contiene ambos A y B, entonces este también contiene  $A \vee B$ .

**Intersección (conjunción):** La intersección de dos conjuntos difusos A y B es un conjunto difuso C, que se escribe como  $C = A \cap B$  o  $C = A \cap B$ , cuya función de membresía está relacionada con las de A y B por:

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad [2.18]$$

Como en el caso de la unión, es obvio que la intersección de A y B es el más grande conjunto difuso el cual está contenido tanto en A como en B. Ésta se reduce a la operación ordinaria de intersección si tanto A como B son no difusos.

**Complemento (negación):** El complemento de un conjunto difuso A, denotado por  $\bar{A}$  ( $\neg A$ , *NO A*) está definido como:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad [2.19]$$

**Producto cartesiano y co-producto:** Sean dos conjuntos difusos A y B en X y Y respectivamente. El producto cartesiano de A y B denotado por  $A \times B$ , es un conjunto difuso en el espacio producto  $X \times Y$  con la función de membresía.

---

<sup>43</sup> (KEVIN M. PAZINO, 1998, p. 59)

<sup>44</sup> (KEVIN M. PAZINO, 1998, p. 58)

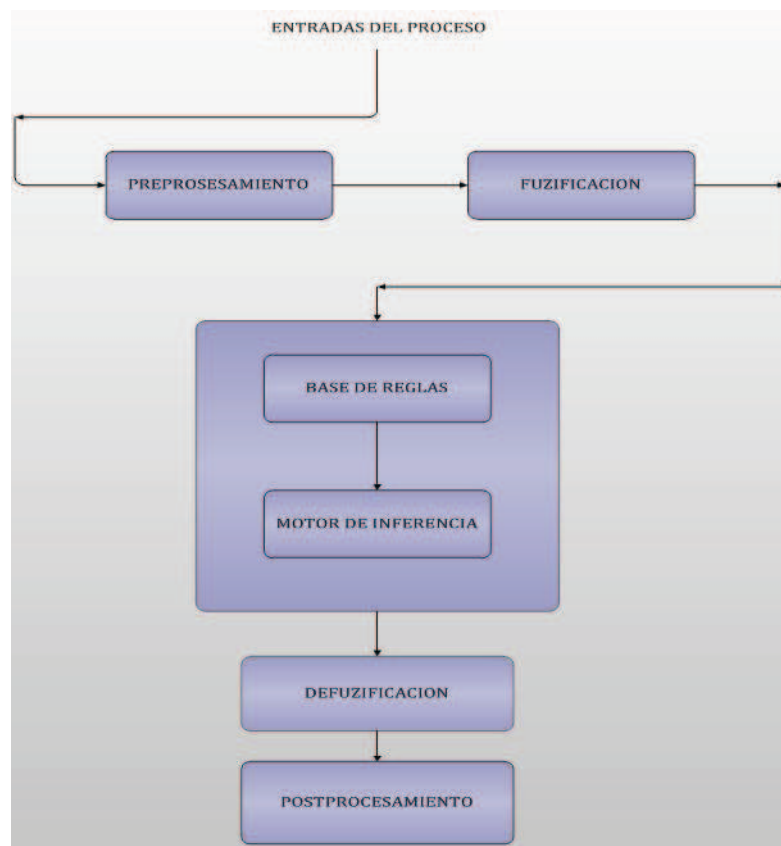
<sup>45</sup> (KEVIN M. PAZINO, 1998, p. 60)

$$\mu_{A \times B}(x, y) = \text{mín}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad [2.20]$$

De forma similar el co-producto cartesiano A + B es un conjunto difuso con la función de membresía:

$$\mu_{A+B} = \text{máx}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad [2.21]$$

### 2.1.8 DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO



**Figura 2.16.** Diagrama de flujo de un controlador difuso<sup>48</sup>

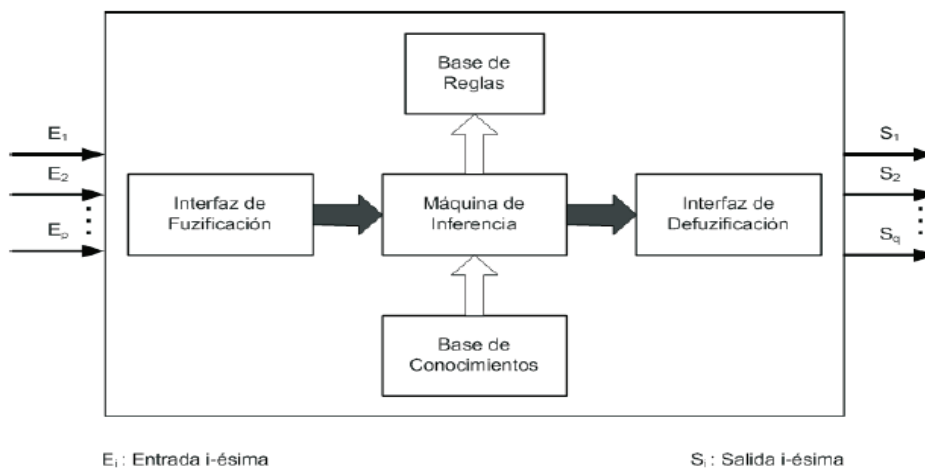
Diseñar un controlador significa esencialmente en escribir las reglas de control, determinando los antecedentes y los consecuentes.

<sup>46</sup> (KEVIN M. PAZINO, 1998, p. 60)

<sup>47</sup> (KEVIN M. PAZINO, 1998, p. 60)

<sup>48</sup> (MIGUEL ANGEL RAMÍREZ, 2005)





**Figura 2.17.** Estructura interna de un controlador difuso

El proceso de diseño de controladores difusos está dividido en tres etapas fundamentales:

1. Fuzificación o determinación de antecedentes y consecuentes
2. Reglas de control o inferencia
3. Defuzificación

El funcionamiento de un controlador difuso sigue este orden en las etapas mencionadas, de tal forma que el resultado a la salida de cada una de ellas depende exclusivamente de los valores encontrados en la etapa inmediatamente anterior.

### 2.1.8.1 FUZIFICACIÓN

En esta etapa del proceso se realiza la traducción de la variable medida al lenguaje del controlador. Así, el valor encontrado será expresado en términos del conjunto difuso y su grado de pertenencia al mismo. Un mismo valor puede pertenecer a varios conjuntos, si éstos se encuentran traslapados, lo que da como resultado que se entreguen múltiples valores de pertenencia para cada variable medida, además es posible que se esté trabajando con más de una variable.



**Figura 2.18.** Interfaz de fuzificación

Para determinar los antecedentes hay que:

1. Seleccionar la información de entrada que se va a incluir en los antecedentes.
2. Fijar las particiones difusas y
3. Fijar los parámetros de las funciones de pertenencia.

Así pues, el verdadero problema en el diseño de controladores difusos, es determinar los antecedentes. Hay tres métodos: conocimiento de los expertos, modelos de operador y modelos difusos de procesos.

En lo que concierne a los consecuentes, como la salida de control (entrada del proceso a controlar) está determinada por el propio proceso, lo único que hay que hacer es fijar los parámetros de las funciones de pertenencia. Si se hace un razonamiento con lógica difusa dentro de un sistema experto se obtiene una expresión también difusa, siendo usual tener que asignarle posteriormente un valor lingüístico.

#### **2.1.8.2 REGLAS DE CONTROL Y MOTOR DE INFERENCIA**

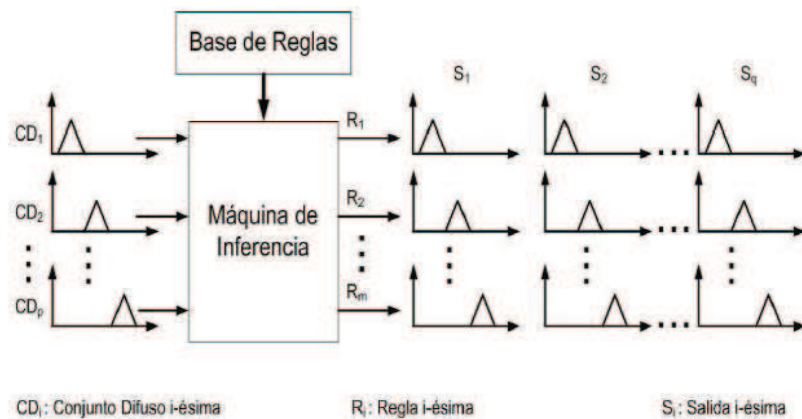
Los sistemas de control difuso permiten describir el conjunto de reglas que utilizar un ser humano para controlar el proceso, con toda la imprecisión que poseen los lenguajes naturales y, sólo a partir de estas reglas, se generan las acciones que realizan el control. Por esta razón, también se les denominan controladores lingüísticos.

La implicación define la etapa donde se evalúan las reglas de inferencia difusa con el fin de dar una respuesta adecuada del sistema ante los valores presentes. Para la elaboración de las reglas se toman en cuenta cada una de las situaciones posibles, lo que lleva a inferir una respuesta para cada caso. El resultado de la inferencia difusa es una variable lingüística en la cual la forma de sus conjuntos difusos, además de haber sido definida previamente, es el resultado de relacionar la salida de cada regla con el conjunto asociado a su respuesta. El proceso de diseño de esta etapa requiere:

- Definir la variable lingüística de salida (variable controlada) determinando las características de sus conjuntos de la misma forma que se hace con los conjuntos de entrada.
- Elaborar una base de conocimientos que permita determinar las acciones adecuadas del controlador en forma de reglas.
- Elaborar el conjunto de reglas de control que determinan el comportamiento del sistema; dichas reglas tienen la estructura:

Si X y Y, entonces Z:

Donde X y Y son los conjuntos difusos de la entrada, para el caso de dos variables, y Z son los conjuntos de salida.



**Figura 2.19.** Bloque de motor de inferencia

La función básica de este tipo de inferencia es la de calcular el valor de la variable de salida del controlador en función de la contribución de cada una de las reglas individuales. La salida del módulo de fuzificación, que representa el valor actual medido de las variables de estado del proceso, se aplica a cada antecedente de las reglas y se calcula así el grado de activación de cada una de las reglas. Sobre la base del grado de activación, que representa el grado de satisfacción de la proposición difusa de los antecedentes, se modifica el conjunto difuso de salida o del consecuente de cada una de las reglas.

Todos los conjuntos de salida modificados según el operador de implicación que se emplee y en función del grado de activación de cada una de las reglas se agrega y forma el conjunto difuso de salida al que se le aplica el operador de defuzificación.

Si se tiene un sistema de dos variables de entrada y una variable de salida:

Entradas:  $i_1, i_2$

Salida:  $u$

Representación de la regla K ésima de la base de reglas:

$$\text{Si } i_1 \text{ es } LI_1^{(k)} \text{ y } i_2 \text{ es } LI_2^{(k)} \text{ entonces } u \text{ es } LU^{(k)}$$

Donde  $LI_1^{(k)}$ ,  $LI_2^{(k)}$  y  $LU^{(k)}$  son los conjuntos de los valores lingüísticos de las variables lingüísticas  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U$  respectivamente, y cuyo significado está representado por los conjuntos difusos con función de pertenencia  $\mu_{LI_1^{(k)}}$ ,  $\mu_{LI_2^{(k)}}$ ,  $\mu_{LU^{(k)}}$

El significado de la regla anterior empleando la función de implicación del mínimo está dada por una relación difusa definida en  $I_1 \times I_2 \times U$  de manera que:

$$\forall i_1, i_2, u: \mu_R^k(i_1, i_2, u) = \min(\mu_{LI_1^{(k)}}(i_1), \mu_{LI_2^{(k)}}(i_2), \mu_{LU^{(k)}}(u)) \quad [2.22]$$

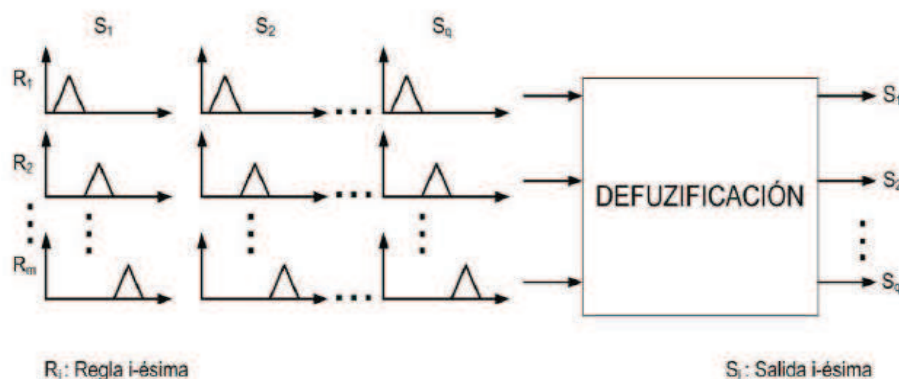
---

<sup>49</sup> (ALVAREZ LOPEZ, 2006, p. 48)

### 2.1.8.3 DEFUZIFICACIÓN

La respuesta de la evaluación de las reglas difusas se encuentra contenida en el conjunto de salida, y está dada por los valores de pertenencia asignados a cada conjunto que determinan una nueva forma para cada uno de ellos. En este punto se tiene la respuesta del controlador en términos de cada conjunto de salida. Sin embargo, es necesario obtener un único valor de salida y que se encuentre en términos numéricos.

Para obtener la respuesta deseada se debe llevar a cabo un proceso inverso a la fuzificación, conocido como defuzificación. Para realizar esta tarea existen varios métodos, pero ninguno se considera más apropiado que otro, por lo cual el usuario puede elegir su método de acuerdo a los requerimientos que exige el sistema.



**Figura 2.20.** Interfaz de defuzificación

Las técnicas de defuzificación más usadas son:

- Centroide o Centro de las Áreas (COA o *Center of Areas*)

$$COG = \frac{\int_a^b f(x)x dx}{\int_a^b f(x) dx} \quad [2.23]$$

- Centro de las Sumas (COS o *Center of Sums*)

<sup>50</sup> (KEVIN M. PAZINO, 1998, p. 45)

- Media de los Máximos (MOM o *Mean of Maximum*)
- Promedio de los Centros (CA o *Center Average*)

## 2.1.9 TIPOS DE CONTROLADORES DIFUSOS

Existen tres tipos fundamentales de controladores difusos<sup>51</sup>. La estructura del consecuente de las reglas distingue a cada uno de ellos.

- Modelo de Mamdani
- Modelo de Tagaki-Sugeno
- Modelo de Tsukamoto

### 2.1.9.1 MODELO DE MAMDANI

Uno de los primeros en llevar a la práctica la lógica difusa en aplicaciones de control fue A. Mamdani<sup>52</sup>. En el modelo del controlador que él estableció, los consecuentes hacen referencia a cambios en la acción de control. Estos cambios son expresados mediante términos lingüísticos o términos numéricos fijos.

Si  $X_i$  es  $A_i$  y.....y  $X_n$  es  $A_n$  entonces  $U$  es  $U_i$ <sup>53</sup> [2.24]

El consecuente de la regla es un conjunto difuso que expresa el significado de un término lingüístico de la variable de salida.

### 2.1.9.2 MODELO DE TAKAGI-SUGENO

En 1985, Sugeno realizó un estudio sobre las posibilidades de incluir en el consecuente nuevas formas de actuación<sup>54</sup>. El nuevo modelo de las reglas que estableció tiene la forma:

---

<sup>51</sup> (DRIANKO, 1993)

<sup>52</sup> (POMARES, 1999)

<sup>53</sup> (ALVAREZ LOPEZ, 2006, p. 40)

<sup>54</sup> (DRIANKO, 1993)

Si  $X_i$  es  $A_i$  y.....y  $X_n$  es  $A_n$  entonces  $U$  es  $F(X_1, \dots, X_n)$  [2.25]

Donde los antecedentes de las reglas continúan siendo conjuntos difusos mientras que el consecuente es una función numérica de las entradas. Usualmente  $F(X_1, \dots, X_n)$  es una función lineal de las entradas  $F(X_1, \dots, X_n) = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n$ . De manera general  $F$  puede ser cualquier función polinómica. Cuando el grado del polinomio es 1 el sistema se denomina “Modelo de primer orden de Sugeno”. Cuando  $F$  es una constante del sistema es equivalente al Modelo de Mamdani utilizando consecuentes no difusos. Cuando  $F$  es una constante se dice que los consecuentes de las reglas son conjuntos difusos de tipo puntual o “sigleton”.

En la mayoría de los casos se necesitan menor cantidad de reglas para obtener una salida deseada si se emplea un controlador de tipo Sugeno que para el caso de Mamdani.

### 2.1.9.3 MODELO DE TSUKAMOTO

En el modelo de Tsukamoto los consecuentes de las reglas son funciones monótonas crecientes o decrecientes que dependen del nivel de activación de la regla<sup>55</sup>. La estructura de las reglas de este modelo es:

Si  $X_i$  es  $A_i$  y.....y  $X_n$  es  $A_n$  entonces  $U$  es  $F(\alpha)$  [2.26]

### 2.1.10 CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DIFUSO

El control difuso tiene tres características principales:

1. Es un control lógico. El calificativo de lógico significa que el algoritmo de control usa expresiones IF-THEN, en las que se puede describir una amplia variedad de condiciones, combinando expresiones lógicas con IF y AND.
2. Es un control disperso. Esta característica, que diferencia esencialmente los sistemas de control difuso de los sistemas de control basados en una

---

<sup>55</sup> (DRIANKO, 1993)

sola ecuación, permite la coexistencia de controladores con lógicas distintas y su ejecución en paralelo.

3. Es un control lingüístico. En efecto permite el uso de variables lingüísticas imprecisas, en particular en los antecedentes de las reglas. Este lenguaje cualitativo es fácil de entender, permite realizar el control mediante un diálogo con los operadores, utilizando sus ojos experimentados en la observación del proceso como entradas externas.

### **2.1.11 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES DIFUSOS<sup>56</sup>**

Se dice que para que un controlador tenga un buen desempeño tiene que haber sido sometido a una buena sintonización. Dependiendo del tipo de controlador, la sintonización sigue un procedimiento u otro, pero en general se puede decir que se sufren dos sintonizaciones, la primera es una sintonización teórica y la segunda normalmente es práctica y se le puede llamar sintonización fina.

En el caso de los controladores difusos, se puede decir que la primera sintonización está implícita en el proceso de diseño y depende de las funciones de pertenencia, incluyendo la forma y los soportes de cada una de ellas, con lo que se caracteriza cada una de las variables de entrada o salida del controlador difuso. Posteriormente se pone a prueba el controlador, para lo que se recomienda hacerlo en simulación para evaluar su desempeño.

Dependiendo de los resultados y el objetivo de control, el controlador puede sufrir varias sintonizaciones finas. En este punto la sintonización se vuelve artesanal y la metodología comúnmente usada para esto consiste en aplicar ganancias a alguna de las variables de entrada y salida del controlador o modificar las funciones de pertenencia. Aplicar ganancias a las variables de entrada y salida del controlador es equivalente a modificar el soporte de las funciones de pertenencia, teniendo un efecto directo sobre la acción de control.

La segunda opción afecta directamente a las funciones de pertenencia y se puede lograr mediante la transformación de la ubicación de los centros de cada una de

---

<sup>56</sup> (ORTIZ DE LA VEGA, 2009)



ellas, modificar su forma o sus parámetros básicos. Un ejemplo de esto es el cambio de funciones triangulares por gaussianas o modificar sus centros de acuerdo a alguna función. Fuera de estos métodos clásicos de sintonización, existen investigaciones en otras áreas de la computación inteligente, donde se combina el controlador difuso con alguna técnica inteligente que sólo tendrá por objetivo sintonizar al controlador. Por ejemplo, el uso del gradiente descendente, auto-sintonización, algoritmos genéticos, etc. Todos los anteriores presentan buenos resultados; sin embargo, son técnicas fuera de línea y su complejidad aumenta ya que además de necesitar conocimientos sobre lógica difusa, se requiere dominar alguna otra técnica de computación inteligente.

## CAPÍTULO 3

### 3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODULO

#### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA



**Figura 3.1** Módulo de control de nivel, izquierda para control PID, derecha para control difuso

Un sensor de nivel de líquido tipo flotador proporciona una señal analógica al controlador, el cual representa el punto actual en el que se encuentra el proceso o

sistema. La señal representa un valor de resistencia, la misma que es acondicionada mediante un circuito integrado para obtener un valor de tensión de 0-10 voltios proporcional a la distancia de nivel a controlar.

El controlador lee una señal externa ingresada a través de una pantalla táctil que representa el valor que se desea alcanzar. Esta señal recibe el nombre de punto de consigna (punto de referencia, mejor conocido como *set point*), el cual es de la misma naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor. Para hacer posible esta compatibilidad y que a su vez, la señal pueda ser entendida por un humano, se ha procedido a normalizar y escalar las señales de entrada de los sensores.

El controlador compara la señal del punto actual y las señal del punto de consigna, que determina en cada instante la situación que hay entre el valor deseado y el valor medido, registrando así valores lingüísticos que se pueden utilizar e interpretar en cada una de las reglas de control, para esto se ha procedido a realizar un programa en el PLC SIMATIC S7-1200 que es un controlador de gama media que posee algunos controles PID para configurar el primer controlador y de diferentes tipos de lenguajes de programación, entre esos el SCL que ha permitido introducir un programa que represente las reglas difusas para el segundo controlador.

El controlador después de aplicar el algoritmo de control, devuelve una señal analógica entre 0-10 voltios conocida como variable manipulada, que es recibida por los variadores de frecuencia (pre actuadores) que controlaran la velocidad de los motores trifásicos que se usan como actuadores en conjunción con una bomba centrífuga acoplada, que manejaran el caudal que ingresa a los tanques.

### **3.1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS**

#### **3.1.2.1 COMPONENTES MECÁNICOS**

##### **3.1.2.1.1 SOPORTE DE MADERA**

Estructura de aglomerado de madera (Tabla triplex)  $e = 20\text{mm}$ , que incluye recubrimiento de fórmica.

Dimensiones principales: Altura= 146 mm, Ancho= 97 mm, Profundidad= 85 mm.

La estructura de soporte cumple con las siguientes características:

- Peso: La estructura y su contenido son lo suficientemente livianos para poder ser transportados con facilidad
- Resistencia a la corrosión por contacto con agua
- Resistencia mecánica del material: Resistencia a los esfuerzos que se generan al cargar el material con la cantidad de agua requerida para la operación.
- Movilidad: Posee ruedas que permiten se transporte con facilidad

### 3.1.2.1.2 SISTEMA HIDRÁULICO

Sistema de tubería de polipropileno monocapa con sistema de alimentación con tanque reservorio y bomba centrífuga.

Tubería monocapa con las siguientes características:

- Diámetros 1/2" y 1"
- Accesorios con sistemas de rosca NPT
- Presión de trabajo máxima de 830 kPa
- Baja resistencia al flujo de líquido de trabajo
- Resistente a la corrosión

Bomba centrífuga de 0.5 HP con motor trifásico, succión de 1" y descarga de 1"



**Figura 3.2.** Bombas centrífugas y tanque principal

### **3.1.2.2 COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS**

#### **3.1.2.2.1 SENSORES Y CONVERTIDOR DE SEÑAL**

El medidor de nivel de tipo desplazamiento utilizado en el módulo consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido unido a una palanca giratoria cuya posición depende del nivel del mismo. El otro extremo de la palanca del flotador tiene un contacto deslizante sobre una resistencia eléctrica que se mueve en sincronización con él, de manera que la posición del contacto sobre la resistencia también depende del nivel del líquido en el depósito. El convertidor recibe la señal de entrada de resistencia y después de modificarla envía la resultante en forma de señal de salida estándar de 0 a 10 volts.

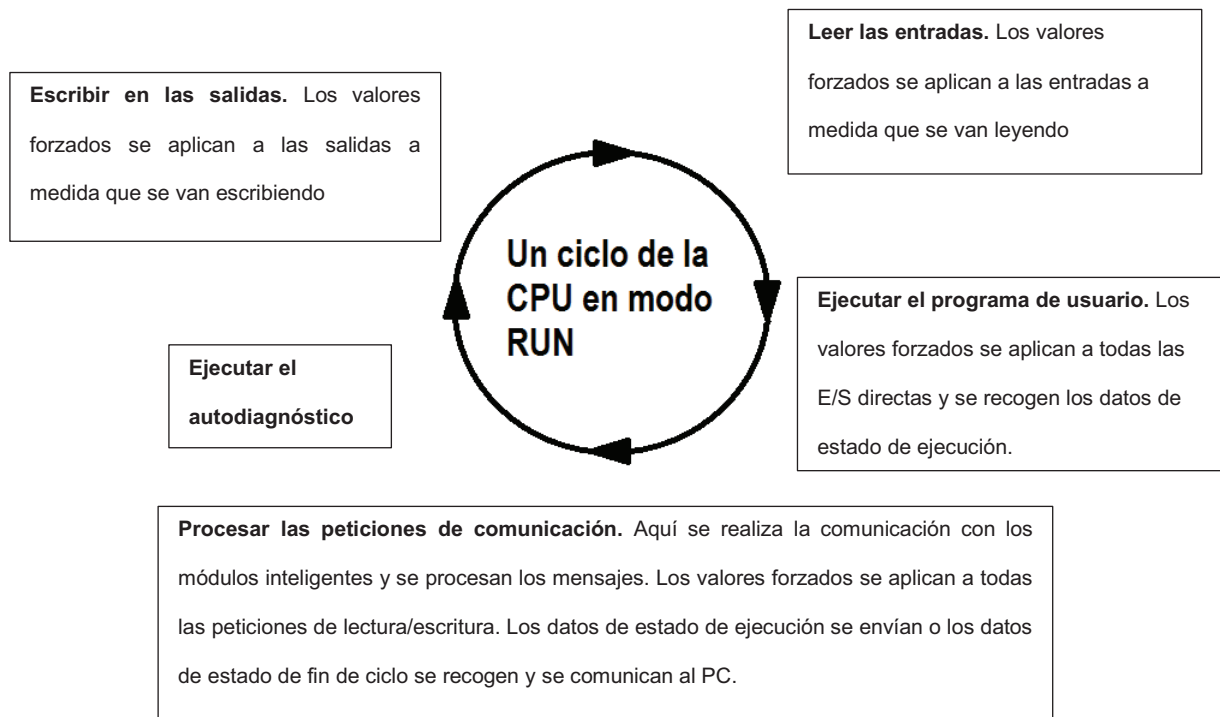
#### **3.1.2.2.2 CONTROLADOR**

Los PLC (programadores lógicos controlables), ver figura 3.3, sirven para realizar diversas operaciones de control, mediante diversos lenguajes, entre los más conocidos, así como los utilizados para la elaboración del tema son: LAD, FBD y SCL. El lenguaje LAD (escalera) es por demás una de las formas de programación más usadas, debido a la semejanza que existe en el cableado de un circuito eléctrico, el lenguaje FBD (bloques) es el segundo más conocido en el medio y es muy usado debido a que se tiene bloques funcionales que pueden ser interconectados para realizar alguna tarea, y finalmente el menos utilizado debido a su complejidad es el lenguaje SCL (estructurado), la complejidad es debido a que se requiere de un programador experimentado que sepa escribir un programa, más no dibujarlo tal como es el caso de los otros lenguajes, es el más adecuado para realizar rutinas complejas ya que en un corto programa en SCL se puede evitar grandes programas de otros lenguajes.



**Figura 3.3.** PLC Simatic S7-1200 Siemens

El PLC cumple una simple rutina que debe ser respetada por todo programador, el PLC tiene un ciclo de programa, de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, por lo tanto todo lo que se escriba bajo o sea llamado como subrutina al final tendrá mayor prioridad, físicamente, se leen las entradas físicas, las transfieren a un área de memoria, recorre todo el programa, escriben las salidas en un área de memoria y finalmente se escriben las salidas físicas, ver figura 3.4.



**Figura 3.4.** Ciclo de programa de un PLC

Hay controladores compactos y modulares, los compactos poseen entradas y salidas incorporadas y son usuales en PLC de gama baja y media, mientras que los modulares tienen sólo la CPU y un puerto de comunicación para ser programado y requiere de periféricas de entrada y salida adicionales, este tipo es muy usual en PLC de gama alta, así como hay posibilidades de una mezcla de los dos tipos tanto compactos como modulares, el tipo mixto, muy usual en los PLC de gama baja y media.

El controlador usado en el proyecto es el PLC Simatic S7-1200, modelo CPU1212 AC/DC/RLY (alimentación 110-220VAC, entradas 24VDC, salidas tipo relé), es un PLC compacto con posibilidad de expansiones (tipo mixto). Este PLC puede tener como expansión 8 módulos de señal (entradas y salidas tanto analógicos como digitales), y tres módulos de comunicación (RS-232, RS-485, Profibus, ASi, etc.).

Para la configuración del PLC se requiere al menos el software de programación Step7 Basic V11 (también puede ser programado mediante el Step7 Professional V11) del TIA Portal Siemens, desde el SP2 (*service pack 2*), permite la instalación en computadores Windows 7 Ultimate o Professional de 64 o 32 bits



**Figura 3.5.** Programación mediante el software TIA Portal de Siemens

### 3.1.2.2.3 PRE ACTUADORES

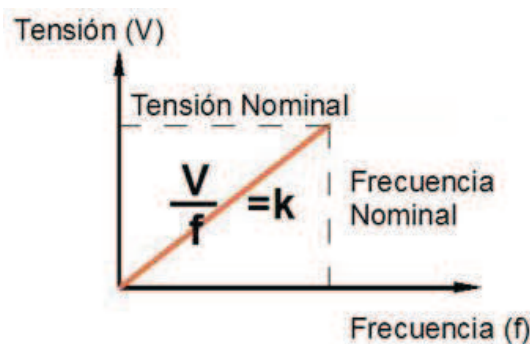
Existen 2 tipos de variadores de velocidad, los escalares y los vectoriales, el variador usado en la tesis es uno de la gama más sencilla, los variadores escalares Sinamics G110, ver figura 3.6. Estos variadores varían el voltaje de

manera proporcional a la frecuencia (V/f), ver figura 3.7, y los mantiene constante en todo el rango de velocidades, logrando un torque constante.



**Figura 3.6.** Variador de velocidad Sinamics G110 de Siemens

En teoría se puede variar la frecuencia de un motor desde 0Hz hasta 400Hz (en los variadores Siemens), claro si se conecta carga, la complicación es que sobre la frecuencia nominal los variadores pierden torque rápidamente debido al deslizamiento y por supuesto el diseño mecánico del motor, por ejemplo los rodamientos, sufrirán cargas para las que no fue diseñada. Así como bajo el 25% de la frecuencia nominal, o sea 15Hz (25% de la frecuencia nominal 60Hz), existen pérdidas por refrigeración, pues la velocidad del ventilador que se acopla al eje del motor no es suficientemente rápido para disipar el calor que genera el motor. Si se desea trabajar en la zona bajo 15Hz o sobre 60Hz se debe sobredimensionar el motor para que sea más resistente a la carga a la que se verá sometida a estas velocidades.



**Figura 3.7.** Regulación escalar

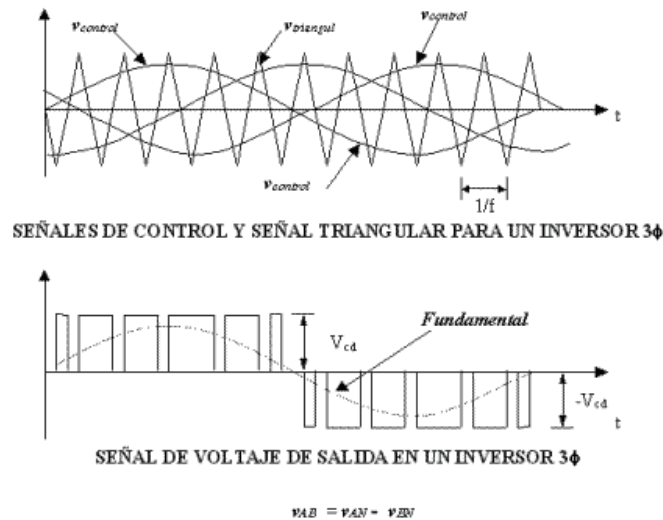


La frecuencia y el voltaje son proporcionales a la velocidad rotórica del motor y se tiene un error de velocidad máximo del 5% en lazo abierto en condiciones normales, tal como se está trabajando a esta tesis. En lazo abierto quiere decir que no existe ningún tipo de realimentación de la velocidad generada por el variador de velocidad, tal como un encoder, donde el error de velocidad puede tender a 0. En control vectorial (con o sin sensor) el error tiende a 0 por lo que es el mejor tipo de control, y en algunas aplicaciones donde el control de velocidad o posición son relevantes se los aplica con resultados formidables. Físicamente un variador de velocidad convierte el voltaje de alterna AC a continua DC, mediante un rectificador trifásico (o bifásico en el caso del variador G110, donde sólo entran 2 fases 220VAC ó 1 fase 220VAC), el mismo se convierte a corriente continua y se rectifica mediante un rectificador de onda completa y se filtra mediante un condensador. Uno de los métodos de comprobación del funcionamiento correcto del variador es verificar la corriente continua que se genera en los terminales DC+ y DC- que tiene el variador, allí se tiene un voltaje de aproximadamente 311VDC (o sea el pico máximo de la onda de alterna luego de ser rectificadas raíz de 2 por 220VAC).

Luego de la rectificación y filtrado de la señal se tiene la parte de inversión (es por eso que algunas personas conocen con el término de inversores a los variadores de velocidad), donde se convierte a la señal de continua DC a señal alterna AC mediante un circuito inversor. El inversor se compone de tiristores IGBT, los cuales son comandados mediante circuitos de control y son aislados mediante fuentes independientes para evitar ponerlos en cortocircuito, el control dispara los IGBT en tiempos precisos para que conviertan la señal continua en alterna, mediante el bus de control se envían las nuevas referencias de velocidad, y el control modifica sus pulsos para que los IGBT actúen de manera coordinada con las necesidades de usuario.

La señal de voltaje que sale de un variador no es para nada parecida a la que se tiene en el ingreso pues la misma ha pasado por un sinnúmero de etapas y la misma se encuentra modificada, la señal es una conocida como SPWM, ver figura 3.8, es una señal senoidal modificada el ancho del pulso, por lo que en un osciloscopio no se ve una senoidal bien formada, más bien se encuentra una

señal llena de pulsos distorsionados y que semejan una senoidal, el caso es que la resultante del mismo es una señal sinusoidal y es compatible con la carga inductiva que poseen los motores trifásicos asíncronos.



**Figura 3.8.** Señal SPWM de un inversor DC/AC

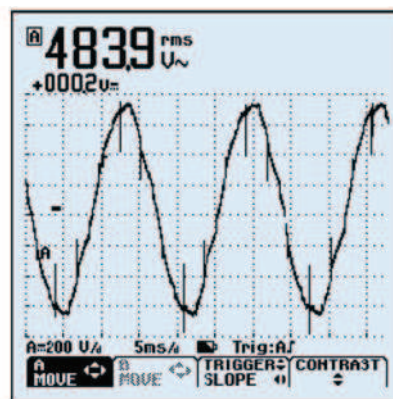
Los motores de hace más o menos 10 años atrás no poseían de fábrica un aislamiento tipo F que los protege de estos pulsos eléctricos, en la actualidad como es tan común su uso vienen como default, y más bien en los motores de altísimas potencias (sobre los 500HP) que pueden trabajar a media o alta tensión, se los debe dimensionar para que posean o no este tipo de aislamiento pues allí se puede discriminar si se va o no a poner un variador de velocidad y así moderar el costo del mismo.

Para motores muy antiguos los variadores modernos no son adecuados, por lo que se tienen filtros que se piden por catálogo para convertir esta señal a una alterna sinusoidal perfecta y así se evite quemar estos motores, este caso es muy común en motores muy grandes pues en motores pequeños se prefiere cambiarlos.

Así como también hay problemas cuando se sobrepasa una longitud que de fábrica llega a ser mayor a 50m con cables apantallados o mayores a 100m con cables no apantallados desde el variador al motor, pues existen efectos capacitivos que incrementan el voltaje en los terminales del motor, produciendo

altos voltajes que por ende llevan a la destrucción del mismo, para esto también existen filtros especiales que eliminan el efecto capacitivo de los cables. Este efecto es muy común en bombas sumergidas ya que normalmente se encuentran a grandes profundidades.

Ahora en la entrada de alimentación de los variadores existe un problema, es muy típico en todo tipo de conversor estático, tales como UPS, fuentes, inversores, variadores, arrancadores suaves, etc., que se tenga elementos tiristores y que modifiquen la señal sinusoidal, pues entran armónicas a la red. Las armónicas causan ruido o distorsiones en la red eléctrica, ver figura 3.9, y afectan a equipos electrónicos, bancos de condensadores (para corregir el factor de potencia), hacen que se sobrecarguen los cables, en especial el neutro, etc., pudiendo interferir en las instalaciones eléctricas que se tiene en una fábrica. Por lo que se sugiere ante esta posibilidad el uso de filtros de armónicos, filtros pasa banda que eliminan los efectos dañinos provocados por los variadores de velocidad a la red.

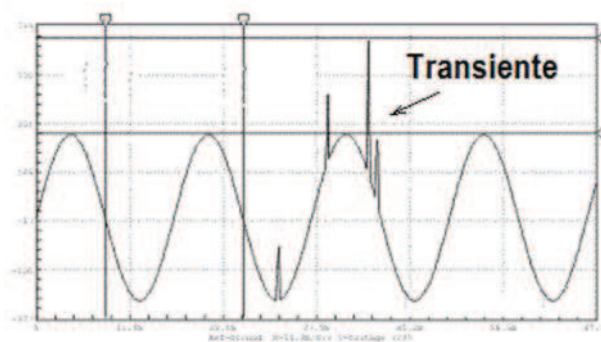


**Figura 3.9.** Forma de onda distorsionada por un variador de frecuencia

Un variador de velocidad cuida de manera perfecta a un motor, evita sobrecarga térmica o cortocircuito y da larga vida al motor por su arranque y parada suave, pero para proteger un variador que constituye de elementos electrónicos muy sensibles, se recomienda elementos rápidos de protección tales como fusibles rápidos. Su uso no es muy frecuente debido al alto costo de los mismos y debido a que la tecnología de los variadores hace que cada vez sean equipos más robustos y no susceptibles a fallas, en tal caso si se encuentran breakers o

guardamotores aguas arriba de un variador su única acción es la de seccionar el equipo.

Otra razón de falla es por transientes de voltaje o corriente que es una de las causas más comunes de falla de estos equipos. Los transientes o transitorios son eventos de muy corta duración, (sub-ciclo), y de amplitud variada. También referidos como “surges” o “altas”, ver figura 3.10. Las fuentes comunes de estos transitorios son los rayos, por la operación de equipos, fallas en éstos, la operación de los dispositivos de interrupción de los sistemas eléctricos y el arqueo de conexiones flojas o fallas intermitentes. Se recomienda usar un estabilizador electrónico que posea limitadores de picos transitorios, ver figura 3.11, un UPS con igual tipo de protección de entrada, o un transformador de ultra-aislación con protectores y filtros.



**Figura 3.10.**Distorsión de la señal de voltaje por transientes



**Figura 3.11.** Supresores de transientes

Para programar el variador de velocidad G110, se tiene el software Starter de Siemens, en el mismo se puede hacer desde la parametrización más básica hasta la más avanzada, todos ellos mediante asistentes que facilitan la programación. El detalle es que aún este variador por ser uno de los más básicos de Siemens, se los parametriza con cable RS-232, y tal como avanza la tecnología se requiere de conversores USB-Serial para poder conectarse a las computadoras lo que hace un poco incómoda su aplicación. Y como se dice este variador es básico, y por lo tanto es para aplicaciones básicas que se pueden desarrollar mediante el panel operador básico BOP (basic operator panel), tal como se puede ver en la figura 3.12, sirve para modificar los parámetros del variador, así como monitorearlos. Y no tan sólo se pueden ver los parámetros sino que se puede ver en línea la frecuencia a la que está trabajando el variador, voltaje, corriente, y así algunos parámetros eléctricos que interesan al momento de arrancar un motor.



**Figura 3.12.** Panel operador básico BOP

Los Sinamics G110 están pre ajustados para motores con una frecuencia nominal de 50 Hz. Se pueden adaptar, por medio el interruptor DIP que se encuentra en la parte frontal, para el funcionamiento con motores de 60 Hz. Para cambiar la posición del interruptor DIP se necesita un destornillador plano, ver figura 3.13.



**Figura 3.13.** Modificación de la frecuencia de alimentación del variador de 50hz a 60hz

### 3.1.2.3 INTERFACES DE USUARIOS HMI

Las interfaces humano máquina HMI (*human machine interface*), poseen la difícil tarea de informar, monitorear y avisar todo lo que ocurre en un proceso a un operador, existen muchos tipos de paneles operadores, los más usuales en la actualidad son los táctiles y los que tienen botones. Los táctiles son preferidos por empresas que quieren aprovechar al máximo la pantalla y hacerla más interactiva con el usuario, en cambio la que se maneja mediante botones es usual en fábricas donde los materiales de los paneles táctiles se destruyen con facilidad. Existen de todos los tamaños (4in a 15in), en toda definición, desde 4 tonos de azules o grises, 256 colores, 16M colores, HD (*high definition*), etc., y en todos los tipos de carcazas, tanto plásticas, aluminio, etc., así como paneles estáticos que se los monta en un tablero y móviles que se mueven con el operador, figura 3.14.

En la tesis se maneja un panel táctil KTP600 PN de 4 tonos de grises, este es un panel básico de Siemens de 6 pulgadas, ver Figura 15, muy atractivo para aplicaciones de gama media. Esta es muy robusta, y es IP67, por lo que puede trabajar sumergida en agua, claro la misma ensamblada en un gabinete adecuado, donde todo el interior del panel esté protegido del agua y polvo, ya que el panel es tan sólo IP20 en su interior.



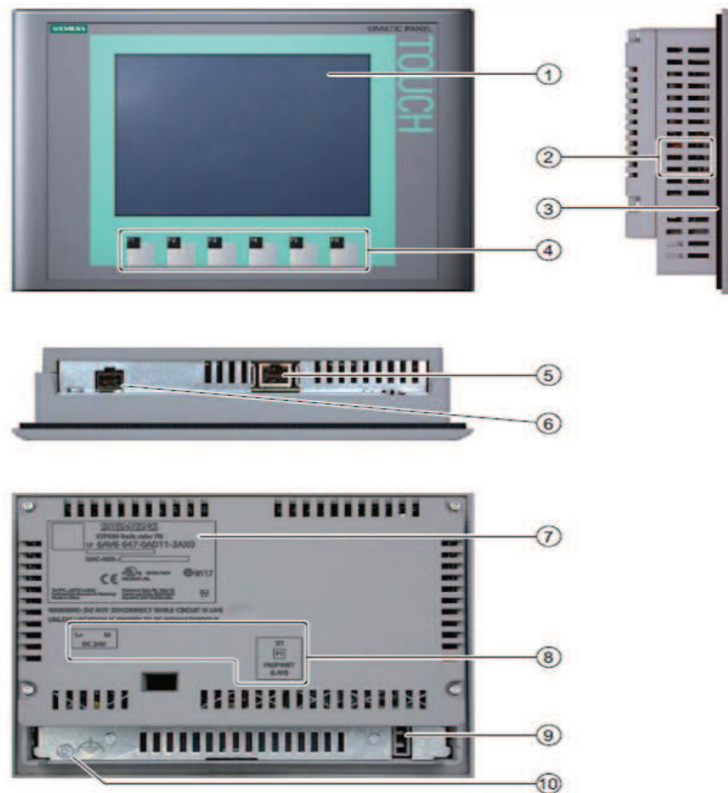
**Figura 3.14.** Interfaces de usuario Siemens

Es un panel muy económico debido principalmente a que sólo posee un puerto de comunicación, el puerto Profinet PN, diferente a sus modelos superiores que poseen muchos puertos tales como Profibus, MPI, USB, Ethernet, Profinet, etc., que los vuelven más costosos, y a la vez mucho más versátiles, pero claro está, son diseñados para otro tipo de aplicaciones.

Físicamente un panel táctil semejante al usado en la tesis es resistivo, por lo que cuando se toca la pantalla varía la resistencia tanto en la coordenada x como en la y, provocando que internamente circuitos que ven diferencias de potenciales sepan exactamente dónde se está presionando.

Para programar el panel táctil se requiere del software WinCC Flexible Advanced 2008 SP2 o al menos el software de programación WinCC Basic V11 (también puede ser programado mediante el WinCC Advanced o WinCC Professional) del TIA Portal Siemens.

Para diseñar una interfaz táctil no sólo se requiere enlazar variables del PLC con el HMI, sino que se debe ser muy hábil para diseñar imágenes (pantallas) agradables para el usuario, por lo que no necesariamente un ingeniero debe diseñar el panel, más bien se recomienda la asesoría de alguien dedicado al diseño gráfico para que le de vida al panel, luego el enlazar variables queda para el ingeniero de desarrollo.



① Display / panel táctil	⑥ Conector de la fuente de alimentación
② Alojamiento para abrazaderas de montaje	⑦ Placa de características
③ Sello de montaje	⑧ Nombre de la interfaz
④ Teclas de función	⑨ Guía para las tiras de rotulación
⑤ Interfaz PROFINET	⑩ Conector de tierra

**Figura 3.15.** Panel táctil KTP600 PN Siemens

Existen algunas aplicaciones que se deben programar en un HMI tales como los avisos y los errores, que muestran las fallas que para el proceso desarrollado son críticas, por ejemplo para la tesis, la falta de agua en el tanque principal, pues las bombas puede llegar a bombear en vacío, o si se aplasta el paro de emergencia, significa que algo pasó en el proceso y se debe tomar medidas correctivas, estas fallas aparecen como un pop-up, y se tiene un dibujo de alarma con el número de alarmas que actúa como manipulador de la ventana de avisos. Una advertencia



no es crítica, por lo que si desaparece lo que provoca la falla desaparece la advertencia, mientras que si existe un error, si desaparece el error, el mensaje persiste hasta que la falla haya sido reconocida por el operador.

Así como el manejo de usuarios, donde se maneja claves de administradores y de usuarios, donde se puede habilitar la edición o monitoreo de variables de cierta imagen importante, que puede desconFigurar una máquina, por ejemplo, en la tesis existen los parámetros del PID, Kp, Ti y Td, los mismos están perfectamente calibrados, pero si por alguna razón varían las condiciones de la planta, se los debe recalibrar, por lo tanto se deja la posibilidad de edición de estas variables con una contraseña de seguridad.

Otros asistentes interesantes son los que manejan recetas, donde se escoge de una lista un valor, y el mismo da al PLC ciertas variables que operan adecuadamente la máquina, o los manejos de lenguaje, pues si se desea hacer maquinaria que sea de exportación, se debe tener presente que debe ser multilingüe la interfaz, con la posibilidad de cambiar el idioma con tan sólo una tecla. Y así hay un sinnúmero de aplicaciones interesantes de los paneles que los hace muy fáciles y versátiles para programar, gracias a que el diseño del software es intuitivo y amigable con el usuario.

### **3.1.2.3.1 COMUNICACIONES MEDIANTE PROFINET IO**

En el marco de la Totally Integrated Automation (TIA), PROFINET IO es la evolución natural de:

- PROFIBUS DP
- Industrial Ethernet

PROFINET IO se basa en más de 20 años de exitosa experiencia con PROFIBUS DP y combina las propiedades de uso habituales con la incorporación de innovadores conceptos de la tecnología Ethernet. Con ello se garantiza la migración sin problemas de PROFIBUS DP al entorno PROFINET.



**Figura 3.16.** Conector Profinet

Así pues, PROFINET IO, entendido como un estándar de automatización basado en Ethernet de PROFIBUS International, define un modelo de comunicación, automatización e ingeniería que funciona con sistemas de diferentes fabricantes.

Con PROFINET IO se aplica una tecnología de conmutación que permite a cualquier estación acceder a la red en todo momento. Así, la red permite un uso mucho más efectivo gracias a la transmisión de datos simultánea de varias estaciones. El modo dúplex del sistema Switched Ethernet permite transmitir y recibir simultáneamente.

PROFINET IO se basa en Switched Ethernet con modo dúplex y un ancho de banda de 100 Mbits/s.

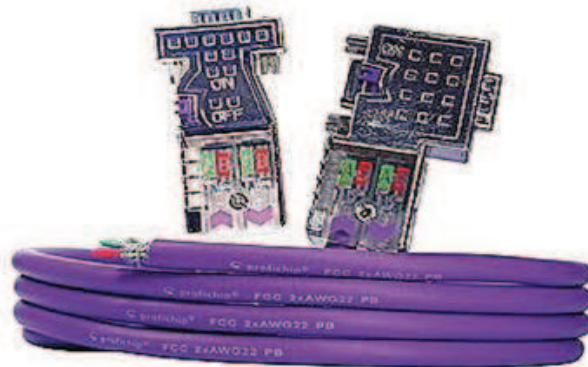
A la hora de desarrollar PROFINET IO se ha puesto especial cuidado en proteger la inversión de los usuarios y los fabricantes de dispositivos. La migración a PROFINET IO se desarrolla manteniendo el modelo de aplicación.



**Figura 3.17.** Switch Industrial Ethernet S7-1200

En comparación con PROFIBUS DP, la vista de los datos del proceso se conserva plenamente en cuanto a:

- Datos I/O (acceso a datos de periferia a través de direcciones lógicas)
- Registros (almacenamiento de parámetros y datos)
- Integración en un sistema de diagnóstico (notificación de eventos de diagnóstico, búfer de diagnóstico)



**Figura 3.18.** Cable y conector Profibus

Eso significa que en el programa de usuario se utiliza la vista habitual para el acceso a los datos del proceso. Ello permite continuar utilizando todos los conocimientos de programación ya existentes. Lo mismo ocurre con perfiles de

dispositivos, como PROFIsafe, PROFIdrive, etc., que también continúan disponibles en PROFINET IO.

También la vista de ingeniería conserva la habitual característica "Look and Feel". La ingeniería de los sistemas de periferia descentralizada continúa desarrollándose con las mismas herramientas que ya se utilizaban en PROFIBUS.

El objetivo de PROFINET es lograr un estándar abierto para la automatización basada en Industrial Ethernet.

Los componentes de Industrial Ethernet y Standard Ethernet pueden utilizarse conjuntamente, aunque los equipos de Industrial Ethernet son más robustos y, por consiguiente, más apropiados para el entorno industrial (temperatura, inmunidad contra perturbaciones, etc.).

- Uso de estándares TCP/IP e IT
- Automatización de aplicaciones con requisito de tiempo real
- Integración directa de sistemas con bus de campo

### **3.1.3 ESTÁNDARES Y NORMAS**

En la actualidad aún siguen persistiendo sistemas de control específicos del fabricante, con programación dependiente y conexión compleja entre distintos sistemas de control. Esto significa para el usuario costos elevados, escasa flexibilidad y falta de normalización en las soluciones al control industrial.

La norma IEC 61131 utilizada en esta tesis es el primer paso en la estandarización de los autómatas programables y sus periféricos, incluyendo los lenguajes de programación que se deben utilizar.

Esta norma se divide en cinco partes:

- Parte 1: Vista general
- Parte 2: Hardware
- Parte 3: Lenguaje de programación

- Parte 4: Guías de usuario
- Parte 5: Comunicación

La norma IEC 61131-3 tiene un gran impacto en el mundo del control industrial y este no se restringe al mercado convencional de los PLC. El uso de IEC 61131-3 proporciona numerosos beneficios para usuarios/programadores. Los beneficios de la adopción de este estándar son varios, dependiendo de las áreas de aplicación: control de procesos, integrador de sistemas, educación, programación, mantenimiento, instalación entre otros. El estándar constituye las especificaciones de la sintaxis y semántica de un lenguaje de programación (texto estructurado), incluyendo el modelo de software y la estructura del lenguaje.

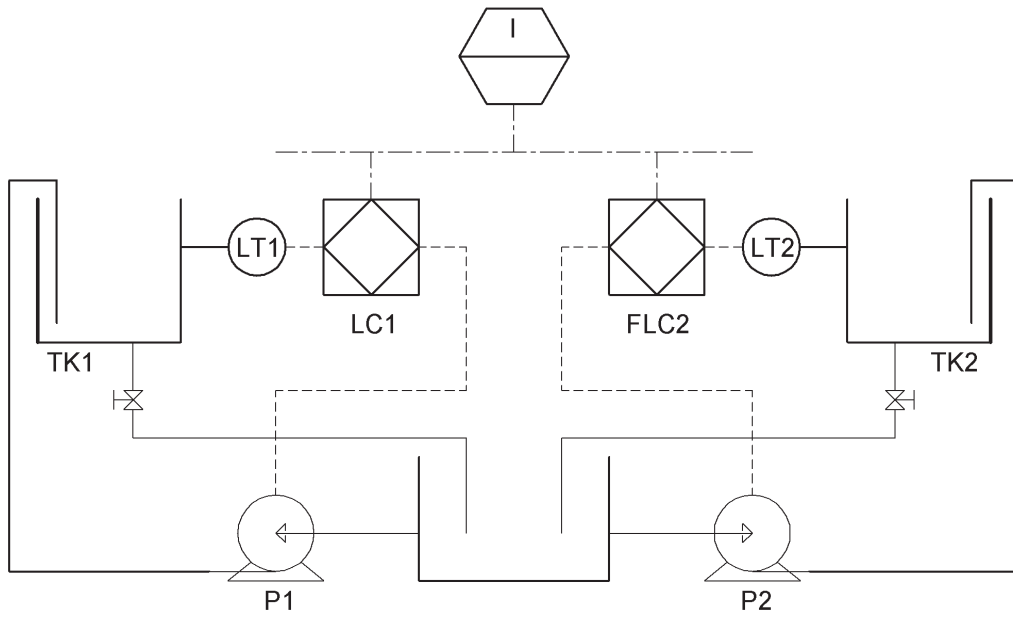
La metodología de este trabajo se basa en un lenguaje estructurado definido en el estándar IEC 61131-3, por tal razón, se ha elegido el PLC S7-1200 de Siemens.

El lenguaje de programación de texto estructurado (ST) del estándar IEC 6113-3 es similar al lenguaje de programación Pascal. Se debe acotar que el lenguaje SCL (*Structured Control Language*) de STEP 7 con el que se realizó el algoritmo de control difuso en esta tesis se basa en ST.

En este mismo estándar, se define un lenguaje de programación de lógica difusa, llamado FCL (*Fuzzy control language*). En el ANEXO 1 se hace una breve descripción de esta norma IEC 61131.

#### **3.1.4 DIAGRAMAS E INSTRUMENTACIÓN**

En la figura 3.19 se describe el diagrama P&ID (diagrama de proceso e instrumentación) del módulo implementado en la tesis, allí se pueden encontrar todos los elementos y su interconexión.



**Figura 3.19.** Diagrama de Proceso e Instrumentación P&ID

**Tabla 3.1.** Detalle de los símbolos utilizados en el control de nivel

SÍMBOLO	ELEMENTO
LT	Transmisor de Nivel
LC	Controlador de Nivel
FLC	Controlador Difuso de Nivel
P	Bomba
TK	Tanque
I	Interface entrada/salida

## **CAPÍTULO 4**

### **4.1 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR**

#### **4.1.1 INTRODUCCIÓN**

En este documento se especifica la forma de implementar un controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en un PLC S7-1200, la elección del esquema Takagi-Sugeno se debe a su menor costo computacional comparado con el sistema difuso tipo Mamdani.

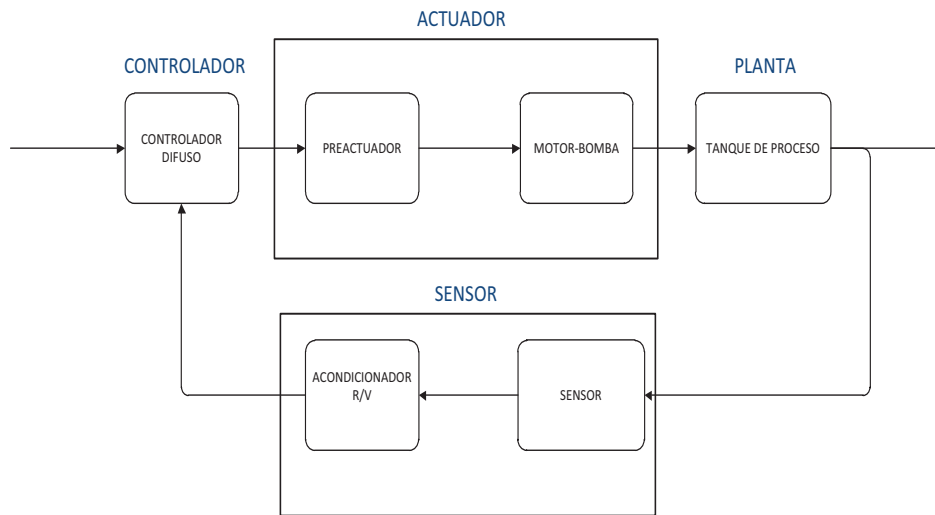
La primera fase del diseño del controlador consistió en estudiar de manera detallada el sistema de nivel con la finalidad de determinar cuáles son los parámetros más importantes que deberían ser tomados en cuenta para el sistema de control inteligente. Se diferenció de manera detallada cuales serían los parámetros de entrada, las variables de salida, variables primarias, variables secundarias o de cálculo. Igualmente se definió el nivel de criticidad de cada parámetro. En este punto fue necesario establecer los principios que se deben cumplir para optimizar el sistema de control de nivel basado en experiencia. El objetivo fue determinar los insumos que se necesitan para generar las reglas del sistema de inferencia difuso que se encargará de controlar la velocidad del motor acoplado a la bomba. Para ello fue importante tener claro los siguientes parámetros: diferencia entre el nivel medido y el punto de referencia, velocidad con la que el nivel se acerca al punto de consigna y velocidad del motor eléctrico acoplado a la bomba.

La segunda fase comprendió el establecimiento de la base de conocimiento basándose en las recomendaciones hechas por parte del fabricante de los equipos. Lo importante en esta fase fue el establecimiento de una base de reglas intuitivas.

La tercera fase contempló la realización como tal del controlador difuso en Matlab y el análisis de los resultados a través de la simulación de los parámetros de entrada y analizando el comportamiento de la salida.

La cuarta fase contempló la realización del controlador difuso en un PLC para hacer las primeras pruebas reales.

#### 4.1.2 ANÁLISIS TEÓRICO



**Figura 4.1.** Sistema de control difuso

Los pasos de aplicación de un modelo difuso son: fuzificación de las entradas, evaluar las funciones de pertenecía de cada entrada de acuerdo con el valor fuzificado, evaluación de las reglas, cálculo y defuzificación de la salida. Los pasos de fuzificación y defuzificación consisten en llevar los valores de entrada y salida a una escala definida en el sistema difuso.

Para el correcto funcionamiento del controlador difuso que regule el proceso de controlar el nivel del líquido, es necesario:

1. Un sensor, que determine el estado del sistema (sensor de nivel).
2. Un controlador, que genere la señal que gobierna el actuador
3. Un actuador, que modifique el sistema de manera controlada formado por un variador como pre actuador y bomba acoplada a un motor trifásico.



### 4.1.3 IMPLEMENTACIÓN

#### 4.1.3.1 ANTECEDENTES

##### 4.1.3.1.1 ERROR $e(t)$

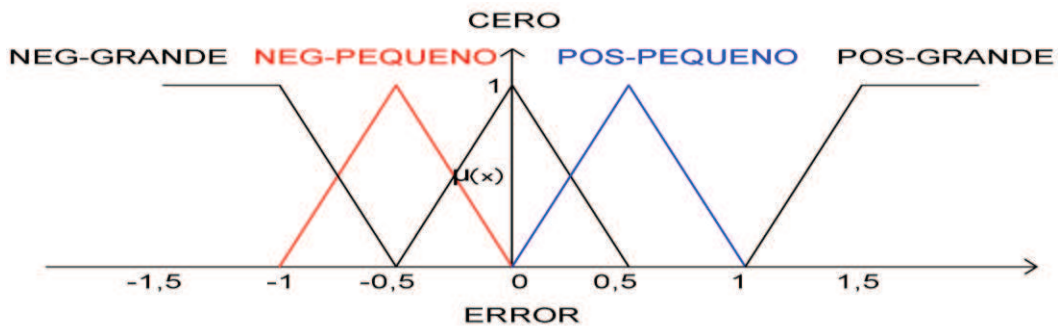
Error es una variable lingüística que indica la diferencia entre el setpoint ( $r$ ) o referencia a la que deseamos llegar y el valor medido ( $h$ ).

$$e(t) = r - h(t) \quad [4.1]$$

El error es positivo si el nivel del líquido se encuentra por debajo del valor de referencia.

El error es negativo si el nivel del líquido se encuentra por encima del valor de referencia.

Se define el rango en que se encuentra este error utilizando una escala entre -1,5 a 1,5 considerando como límites suficientes para este proceso.



**Figura 4.2.** Funciones de pertenencia de la variable “error”

##### 4.1.3.1.2 CAMBIO EN EL ERROR $\frac{d}{dt}e(t)$

Para obtener la variable lingüística “Cambio en el error” se deriva la ecuación del error.

$$e(t) = r - h(t)$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = -\frac{d}{dt}h(t) \quad [4.2]$$

Entonces el cambio en el error es igual al negativo de velocidad con la que cambia el valor medido en el tanque.

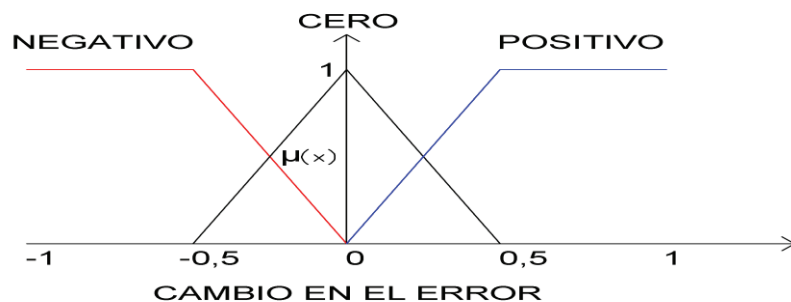
Las tres funciones de pertenencia para representar a la segunda variable lingüística “Cambio en el error”, en las reglas de control, se definen por negativo, cero y positivo, que representan la tasa de cambio para el nivel, lo cual permite al controlador actuar ante un cambio en el flujo.

Para representar a la variable lingüística “Cambio en el error”, se establece una escala de -1 a 1 unidades, por lo que sus parámetros quedan de la siguiente manera:

Cambio en el error negativo de -1 a 0

Cambio en el error es cero de -0,5 a 0,5

Cambio en el error es positivo de 0 a 1



**Figura 4.3.** Funciones de pertenencia de la variable “cambio en el error”

- Si el error es negativo pequeño y el cambio en el error es negativo y puesto que  $\frac{d}{dt}h(t) < 0$  significa que el nivel del líquido está por encima de la referencia y se acercando lentamente a la misma.
- Si el error es positivo pequeño y el cambio en el error es positivo y puesto que  $\frac{d}{dt}h(t) < 0$  significa que el nivel del líquido está por debajo de la referencia y se acerca lentamente a la misma.

#### 4.1.3.2 CONSECUENTES

La salida del controlador tienen cinco funciones de conjuntos difusos tipo puntual o "singleton" que representan a la "VELOCIDAD" como una variable lingüística, estas son: BAJAR-RÁPIDO, BAJAR-DESPACIO, MANTENER, SUBIR-DESPACIO, SUBIR-RÁPIDO, mediante estas constantes se representa la acción que debe realizar el variador de velocidad.

Para representar los parámetros de las funciones de membresía se utiliza una escala que va de 0 a 10 volt que es la salida del PLC y será proporcional a la velocidad que establezca el variador.

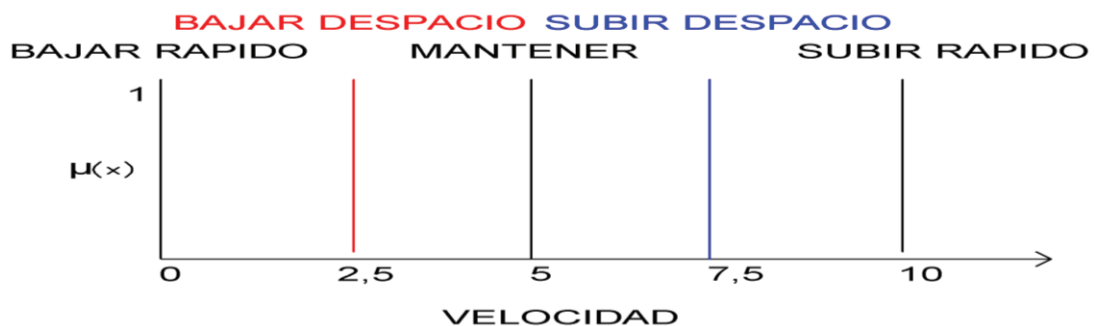
Salida BAJAR RÁPIDO velocidad de 0 voltios

Salida BAJAR DESPACIO velocidad de 2,5 voltios

Salida MANTENER velocidad de 5 voltios

Salida SUBIR DESPACIO velocidad de 7,5 voltios

Salida SUBIR RÁPIDO velocidad de 10 voltios



**Figura 4.4.** Funciones de pertenencia de la variable "velocidad"

#### 4.1.3.3 REGLAS DE CONTROL

Una vez que se tienen las variables lingüísticas representadas por conjuntos difusos se establece una base de reglas para que el controlador pueda determinar cuáles son las acciones que debe de tomar a la salida.

Las reglas expresadas en lenguaje natural quedan de la siguiente manera:

- Si el error es negativo grande entonces bajar rápido velocidad
- Si el error es negativo pequeño entonces bajar despacio velocidad
- Si el error es cero entonces mantener velocidad
- Si el error es positivo grande entonces subir rápido velocidad
- Si el error es positivo pequeño entonces subir despacio velocidad
- Si el error es cero y cambio en error es negativo entonces subir despacio velocidad
- Si el error es cero y cambio en error es positivo entonces bajar despacio velocidad

#### **Análisis de las dos últimas reglas:**

Cuando el líquido este cerca del nivel de referencia, si el cambio en el error es negativo, se debe subir lentamente la velocidad para evitar que por la inercia de la relación llenado-vaciado se encuentre el líquido por debajo de la consigna, y al entrar en funcionamiento una regla inversa, provoque inestabilidad o bien oscilación alrededor de la referencia

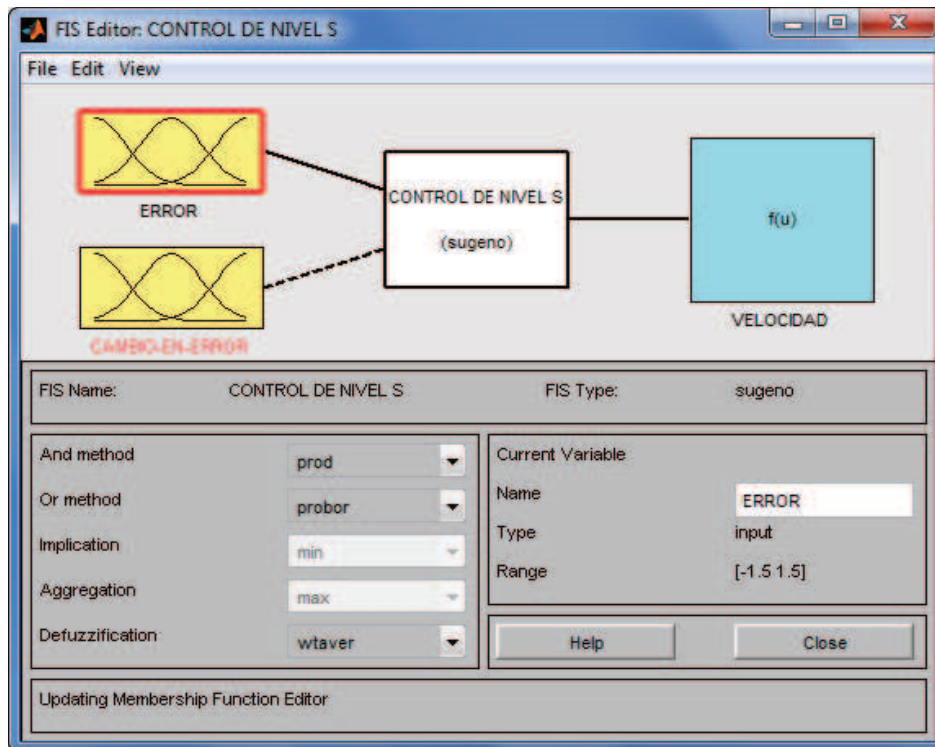
### **4.1.4 ANÁLISIS EXPERIMENTAL**

#### **4.1.4.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA**

En los últimos años son numerosas las herramientas que se han elaborado para el desarrollo de sistemas basados en lógica difusa. La herramienta que tiene un mayor número de usuarios y que será utilizada en esta tesis, lo constituye la herramienta "FUZZY" para lógica difusa que tiene el paquete de programas MATLAB. Esta herramienta emplea el método aproximado para la implementación software de los sistemas que garantiza una gran versatilidad del sistema al permitir trabajar con cualquier tipo de función de pertenencia y operadores.

- **PLANTEAMIENTO DEL PROCESO**

Cuando se diseña un controlador difuso el primer paso es seleccionar la estructura del controlador que se va a implementar. En este caso permite trabajar controladores de tipo Sugeno y de tipo Mamdani que son las estructuras clásicas que tiene un controlador basado en lógica difusa, además de definir las variables lingüísticas que se aplicaran.



**Figura 4.5.** Definición de variables

- **ANTECEDENTES Y CONSECUENTES**

El editor de variables permite editar las funciones de pertenencia de cada una de las variables lingüísticas (antecedentes y consecuentes) definidas en el sistema. Mediante el editor de propiedades del sistema se modifican de manera muy sencilla, cada uno de los parámetros de las funciones de pertenencia o conjuntos difusos en cada una de las variables.

El sistema tiene implementado por defecto funciones de tipo Trapezoidal (en su caso particular de funciones triangulares), además de poseer funciones tipo Curva S, Curva Z, Campana de Gauss.

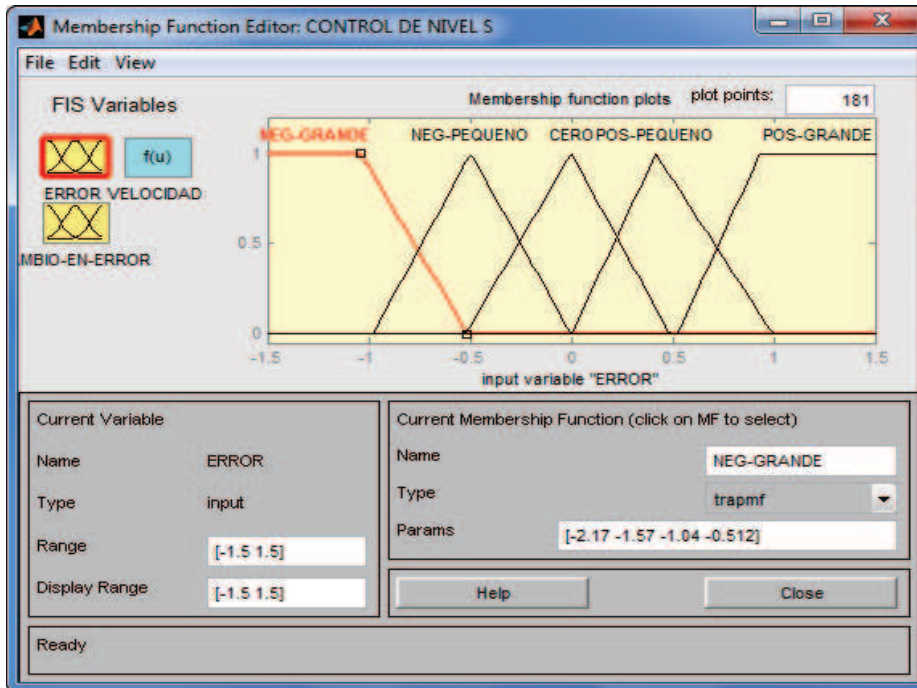


Figura 4.6. Variable de entrada “error”

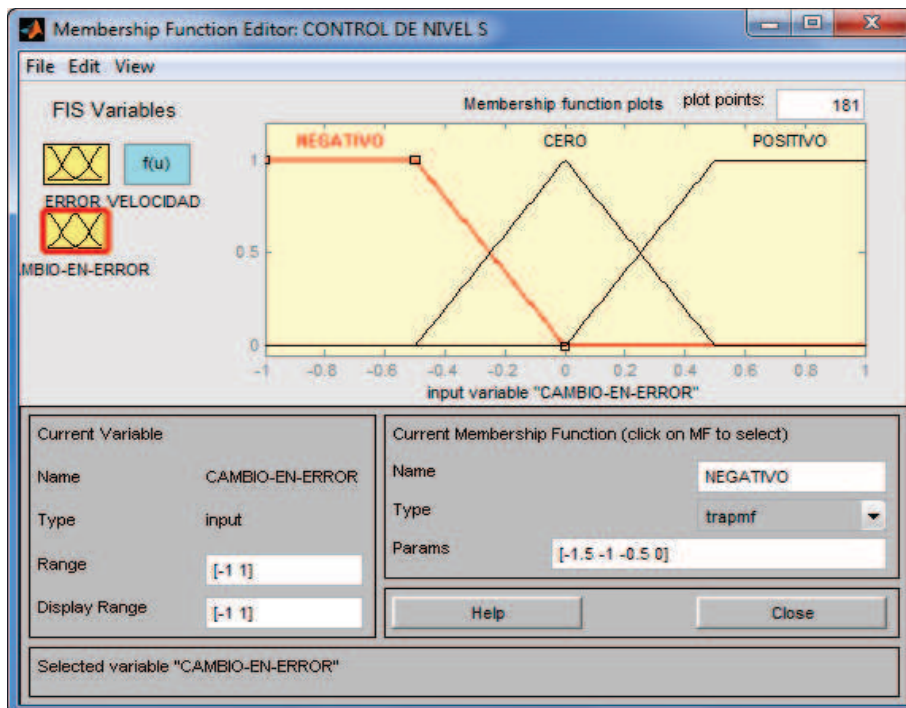


Figura 4.7. Variable de entrada “cambio en el error”

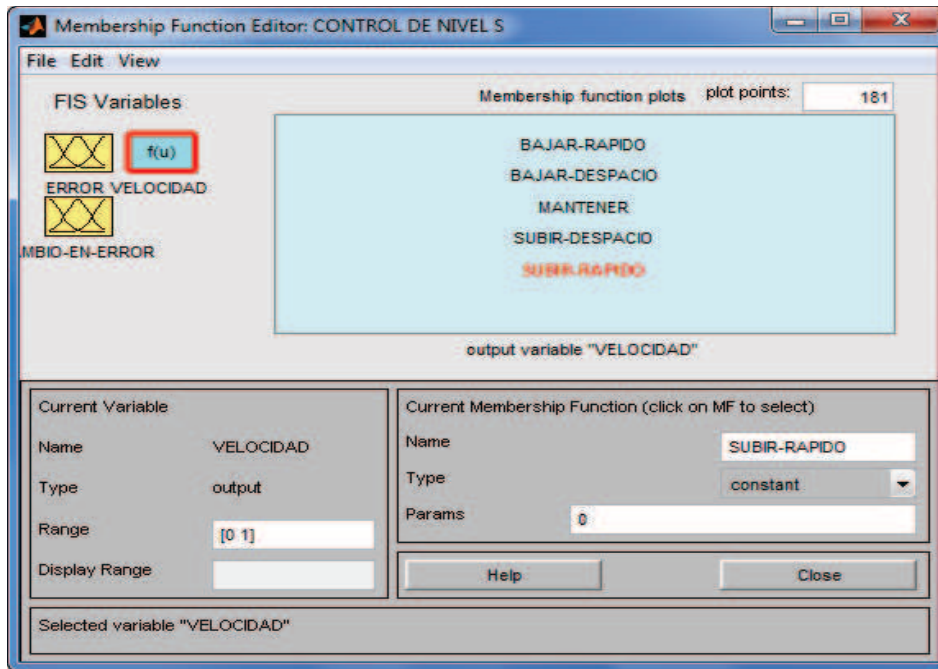


Figura 4.8. Variable de salida “velocidad”

- **REGLAS DE CONTROL**

La base de reglas de un controlador difuso contiene la información o conexión lógica entre las variables lingüísticas de entrada y de salida del sistema. El sistema trabaja con reglas de tipo MISO (Multiple Inputs, Single Output).

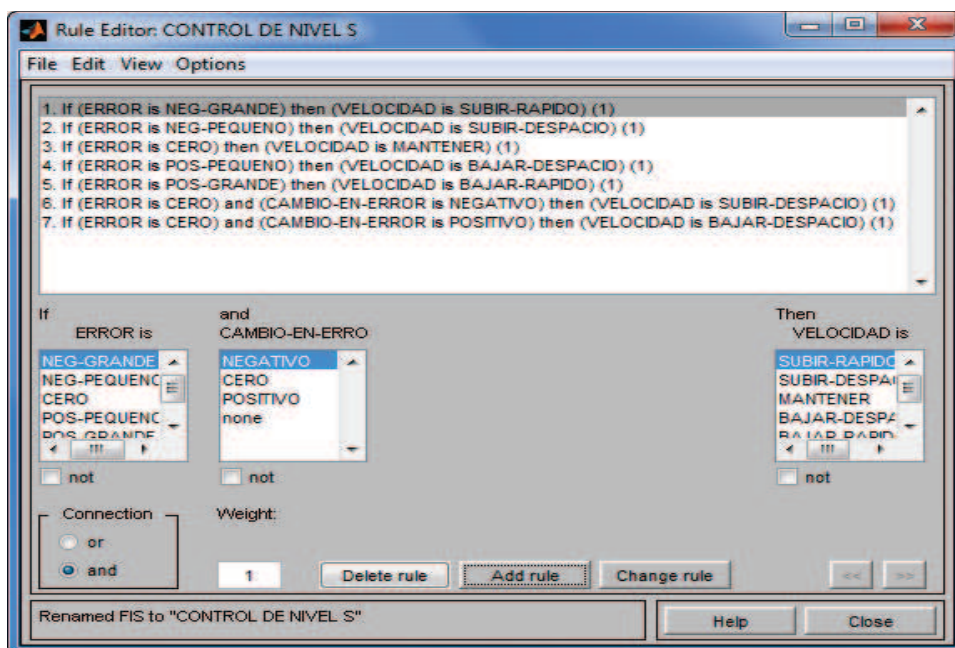
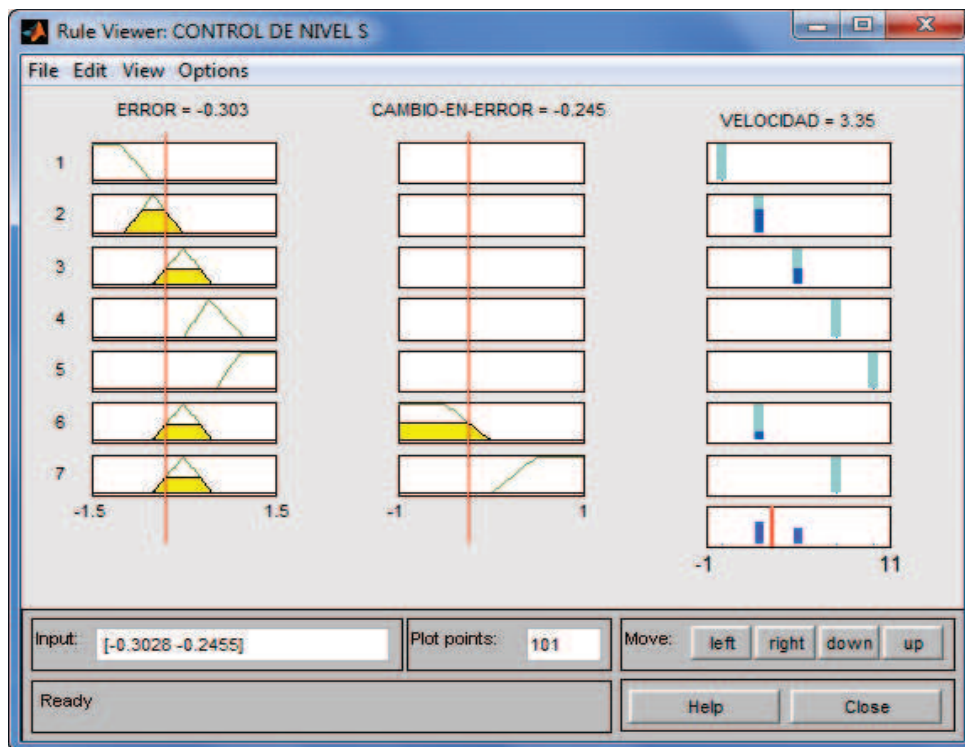


Figura 4.9. Reglas de inferencia

- **RESULTADOS**

Una vez que el sistema ha sido diseñado es importante estudiar el comportamiento del mismo. La visualización del grado de activación de cada una de las reglas para un determinado vector de entradas constituye sin dudas una herramienta muy importante en el análisis del comportamiento del sistema diseñado



**Figura 4.10.** Comportamiento del sistema de nivel

- **GRAFICO DE SUPERFICIE DE CONTROL.**

El sistema permite la visualización grafica de la respuesta del sistema mediante la superficie de control o mediante curvas de relación de entradas/salidas.



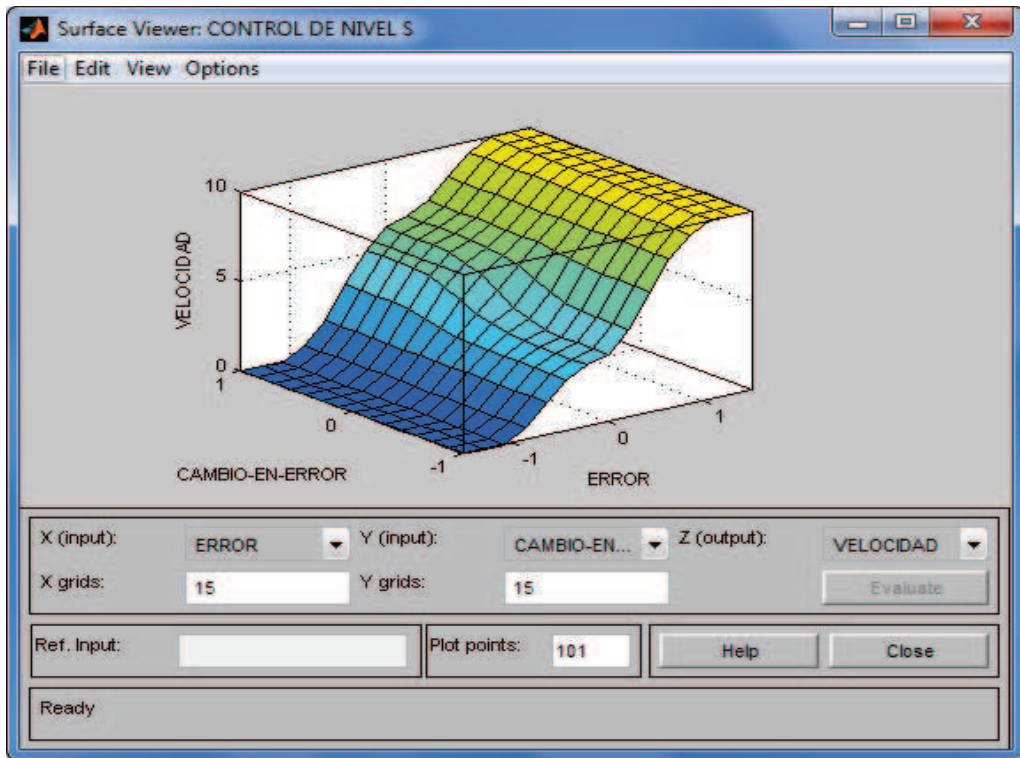


Figura 4.11. Superficie de control

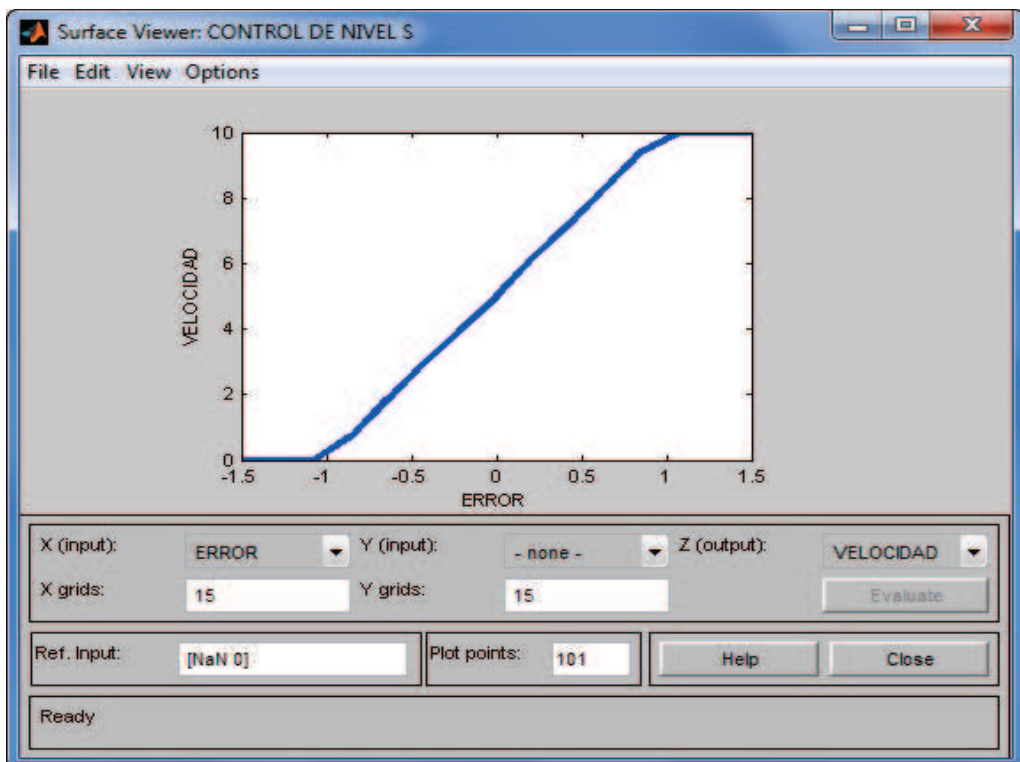
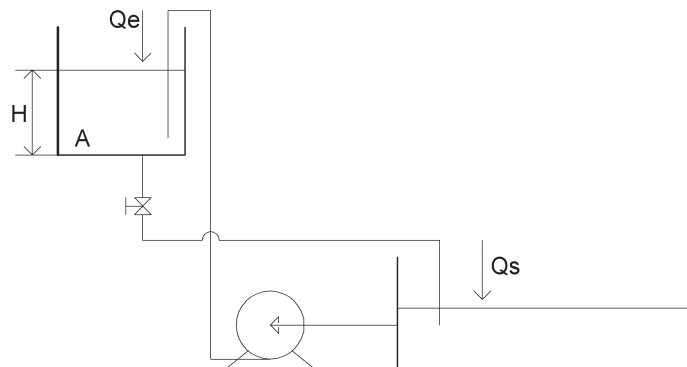


Figura 4.12. Curva de relación "Error vs. Velocidad"

#### 4.1.5 MODELADO MATEMÁTICO DEL CONTROLADOR PID

Al analizar sistemas que implican el flujo de líquidos, resulta necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento, de acuerdo con la magnitud del número de Reynolds. Si el número de Reynolds es mayor que entre 3000 y 4000, el flujo es turbulento. El flujo es laminar si el número de Reynolds es menor que 2000. En el caso laminar, tiene lugar un flujo estable en las corrientes, sin turbulencia



**Figura 4.13.** Representación esquemática del sistema físico

Cálculo de la Resistencia:

Constantes de constricción de la salida del Tanque					
$H_1(m)$	$H_2(m)$	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$V(m^3)$	$R$
0,101	0,045	3,63	3,10	0,00045	2642,21

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{H_1 - H_2}{Q_1 - Q_2}$$

$$Q_i = \frac{V_i}{t_i}$$

$$V_1 = V_2 = V$$

$$R = \frac{H_1 - H_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{H_1 - H_2}{\frac{V_1}{t_1} - \frac{V_2}{t_2}} = \frac{H_1 - H_2}{V \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)}$$

$$R = \frac{0,101 - 0,045}{0,00045 \left( \frac{1}{3,63} - \frac{1}{3,10} \right)} = 2642,2 \frac{s}{m^2}$$

Dimensiones del Tanque	
$D(m)$	$A(m^2)$
0,33	0,086

Calculo del Número de Reynolds para una altura de líquido entre 2 y 18 cm:

$$R_e = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v \cdot D}$$

Numero de Reynolds			
$H(m)$	$Q(m^3/s)$	$R_e$	Tipo de Flujo
0,02	0,076	755,09	Laminar
0,185	0,070	6984,62	Turbulento

Un sistema se considera lineal si el flujo es laminar. Aunque el flujo sea turbulento, el sistema puede linealizarse si los cambios en las variables se mantienen pequeños. A partir de la suposición de que el sistema es lineal o linealizado, la ecuación diferencial del sistema se obtiene del modo siguiente.

$$Q_e - Q_s = A \times \dot{H}$$

$$Q_s = \frac{H}{R}$$

$$Q_e - \frac{H}{R} = A \times \dot{H}$$

$$Q_e = Q$$

$$Q = A \times \dot{H} + \frac{H}{R}$$

Tomando la Transformada de Laplace:

$$\mathcal{L}[Q] = \mathcal{L}\left[A \times \dot{H} + \frac{H}{R}\right]$$

$$Q(s) = A \cdot \dot{H}(s) + \frac{1}{R} \cdot H(s)$$

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

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

Ecuación de Transferencia del controlador PID:

$$G_c = K_p + K_d \cdot s + \frac{K_i}{s}$$

Ecuación de Transferencia de la Planta:

$$G_p = \frac{R}{(A \cdot R)s + 1}$$

Considerando que las perturbaciones no alteran el sistema tenemos:

$$H = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_p(s)}$$

#### 4.1.6 DETERMINACIÓN DE CONSTANTES $K_p$ $K_i$ $K_d$

El tiempo de respuesta de un sistema se representa en el gráfico de la variable controlada del lazo en función del tiempo, el desempeño dinámico del sistema será analizado basado en estos gráficos, teniendo en cuenta las características de la respuesta como son el Tiempo de subida, tiempo de estabilización, error en estado estable, y sobrepicos, además se debe tener en cuenta para el proceso de sintonización como reaccionara el lazo de control ante los cambios en las constantes  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ .

Se define los siguientes conceptos:

- Tiempo de Retardo ( $T_d$ ). Es el tiempo requerido para que la salida alcance el 50% de su valor final en estado estable.
- Tiempo de Subida ( $T_r$ ). Es el tiempo requerido para que la salida suba desde el 10% hasta el 90% de su valor final en estado estable.
- Tiempo de Estabilización ( $T_{ss}$ ). Se define como el tiempo tomado por la respuesta para alcanzar y permanecer dentro de un específico rango de error. Es usualmente expresado como porcentaje del valor final en estado estable, el error tolerable esta entre el 2-5% del valor final.
- Error en estado estable ( $E_{ss}$ ). Es la diferencia observada entre el valor final en estado estable y el valor deseado de la variable.
- Sobre pico máximo ( $M_p$ ): es la relación del valor pico máximo de la curva de respuesta al valor de la respuesta en estado estable.

**Tabla 4.1.** Efectos del incremento de las constantes de un controlador PID en un bucle cerrado

Parámetros	Tiempo Subida ( $T_r$ )	Sobrepicos ( $M_p$ )	Tiempo de Estabilidad ( $T_{ss}$ )	Error ( $E_{ss}$ )
<b><math>K_p</math></b>	Decrece	Incrementa	Pequeño cambio	Decrece
<b><math>K_i</math></b>	Decrece	Incrementa	Incrementa	Decrece significativamente
<b><math>K_d</math></b>	Menor Decrecimiento	Decrece	Decrece	No afecta

Las relaciones expresadas en la tabla 4.1 puede que no sean demasiado precisas y solo se deben usar como referencias, porque los efectos de las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  dependen los unos de los otros. De hecho, al variar el valor de una de estas variables puede que se modifiquen los efectos producidos por las otras dos.

Teniendo la función de transferencia del controlador y de la planta, usaremos Matlab para obtener las constantes del sistema, usando como guía la tabla 4.1 para mejorar la respuesta y por medio de un proceso iterativo encontrar las características del sistema que coincidan con los valores reales obtenidos que a continuación se detallan:

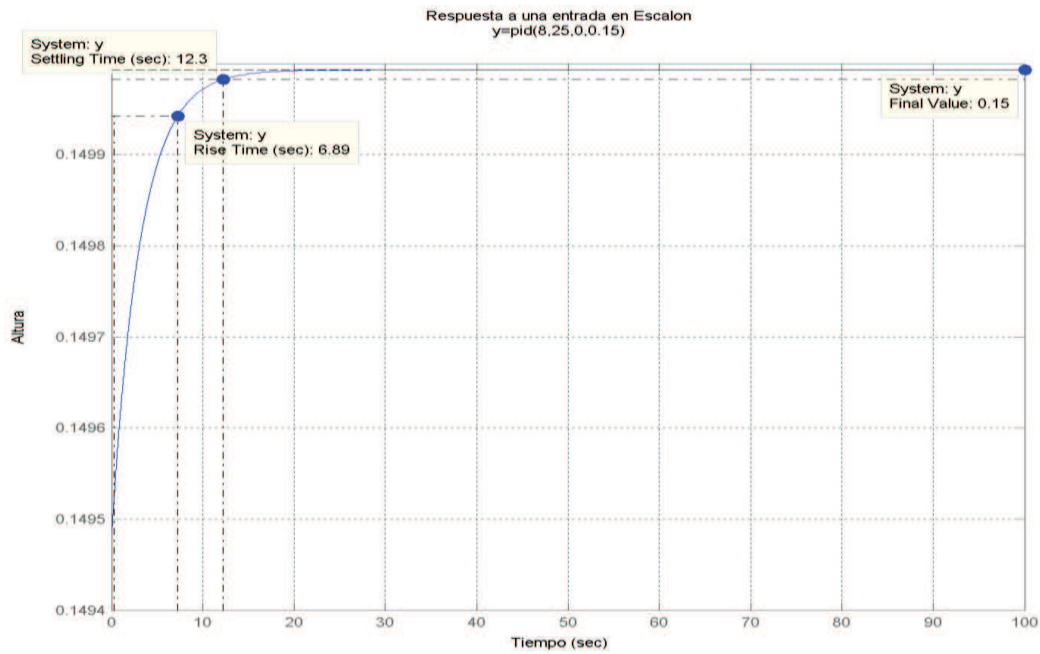
**Tabla 4.2.** Valores reales del sistema

Parámetros	Tanque
Referencia (m)	0.15
Tiempo de subida $T_r$ (seg)	25
Tiempo de estabilización $T_{ss}$ (seg)	40
Max % error	1
Max sobrepico	0.004

Desarrollo de una función tipo .m en Matlab para el proceso de sintonización.

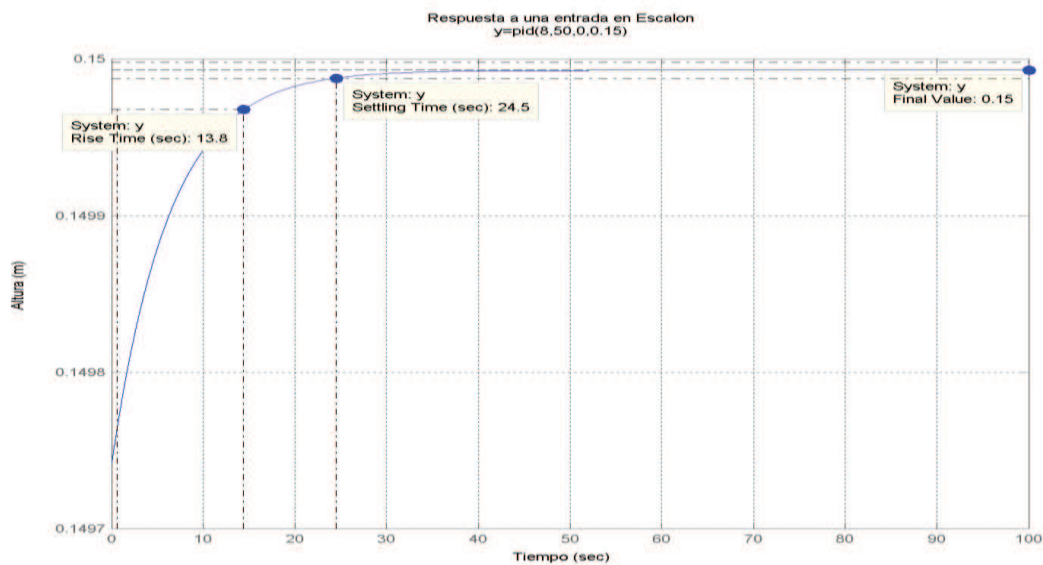
```
function y=pid(kp, kd, ki, r)
syms gp gc h
s=tf('s')
gp=2642/(227.21*s+1)
gc=kp+kd*s+ki/s
y=gp*gc*r/(1+gp*gc)
H=gp*gc/(1+gp*gc)
step(y)
```

- Primer intento de sintonización: Ante una señal paso, la respuesta es demasiado rápida, la planta no puede llegar a esta velocidad de respuesta.



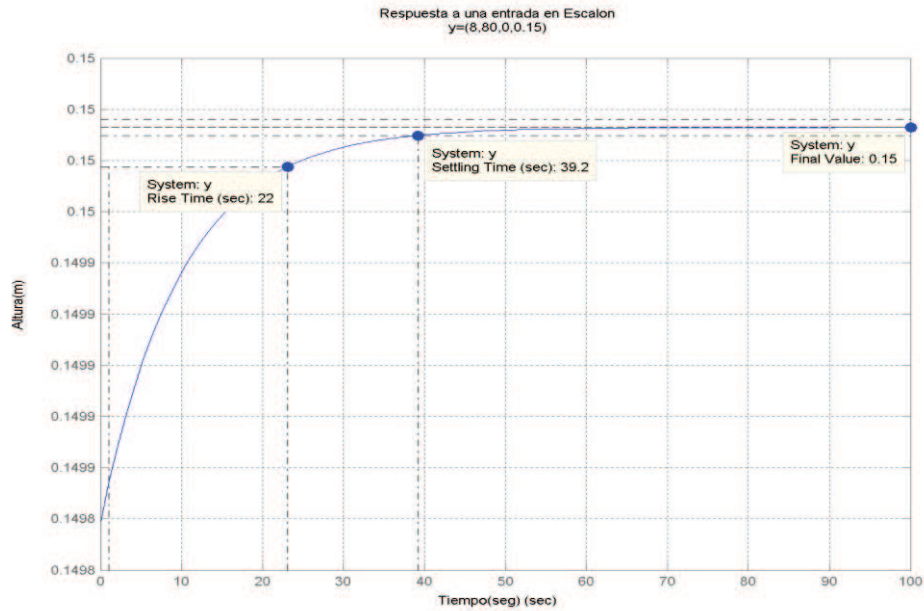
**Figura 4.14.** Respuesta a una entrada escalón  $y=pid(8,25,0,0.15)$

- Segundo intento de sintonización: La respuesta aún sigue siendo demasiado rápida al igual que en el primer intento de sintonización.



**Figura 4.15.** Respuesta a una entrada escalón  $y=pid(8,50,0,0.15)$

- Tercer intento de sintonización: La respuesta ante una señal paso es adecuada a la planta, por lo que sus parámetros son ingresados al controlador.



**Figura 4.16.** Respuesta a una entrada escalón  $y=\text{pid}(8,80,0,0.15)$

**Tabla 4.3.** Parámetros obtenidos para sintonización del lazo de control PID

PARÁMETROS OBTENIDOS PARA SINTONIZACIÓN INICIAL DEL LAZO DE CONTROL PID		
<b>Kp</b>	<b>Ki</b>	<b>Kd</b>
8	0	80



## CAPÍTULO 5

### 5.1 SÍNTESIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El control de nivel de líquido es un proceso muy utilizado en la industria, se ha escogido este sistema debido a sus características no lineales que nos ayudaran a relacionar el comportamiento de un controlador difuso con un controlador PID.

En la teoría de control convencional una de las primeras tareas que se debe llevar a cabo es el desarrollo del modelo matemático del proceso a ser controlado, al ser un problema de fluidos el primer paso fue el cálculo del número de Reynolds para diferentes niveles de líquido, que mostro la presencia de flujo laminar y turbulento en el sistema. . Los sistemas que contienen un flujo turbulento a menudo deben representarse mediante ecuaciones diferenciales no lineales, en tanto que los sistemas con un flujo laminar pueden representarse mediante ecuaciones diferenciales lineales. Se desarrolló entonces un modelo asumiendo que el sistema puede linealizarse si los cambios en las variables se mantienen pequeños.

El control PID es muy usual en la industria y es ideal para casi todo tipo de procesos, en teoría donde no puede ser usado este controlador es en procesos demasiado rápidos, como por ejemplo control de estabilidad, control de péndulos, etc., donde el algoritmo complejo del PID toma demasiado tiempo de respuesta, mientras que el difuso tiene tiempos de respuesta excelentes ya que no tiene algoritmos complejos y su tiempo de respuesta es excelente.

A partir de la suposición de que el sistema es lineal o linealizado, y con el objetivo de comparar el rendimiento del controlador PID con el difuso, el siguiente paso es lograr un control eficiente de la variable del proceso realizando una sintonización adecuada del sistema.

El objetivo de la sintonización del sistema es lograr un control “robusto” que tenga la característica de mantener la variable de proceso muy estable a pesar de los cambios de carga, producir una rápida respuesta ante los cambios de setpoint, una mínima oscilación sin importar el tiempo de cambio y un mínimo offset (error entre el valor de *set point* y variable de proceso) en el tiempo. Hay que tener en

mente que es difícil lograr todas estas características en conjunto con cualquier sintonización de un controlador PID. Se debe intentar priorizar o hacer un ranking de la importancia de estos objetivos, y luego centrarnos en lograr los más importantes, a expensas de los menos importantes. Por tanto, debemos primero determinar las necesidades operacionales de un sistema de control antes de intentar ajustar directamente la performance de ese sistema de control.

Para este estudio se ha priorizado el control de estabilidad del sistema, la respuesta ante los cambios de carga y la eliminación de los sobrepicos por sobre su velocidad de respuesta debido a las características físicas del equipo.

Puesto que casi todos los controladores PID se ajustan en el sitio, en la literatura se han propuesto muchos tipos diferentes de sintonización delicada y fina de los controladores PID. Asimismo, se han desarrollado métodos automáticos de sintonización.

El problema con el diseño del control realimentado será esencialmente lograr una óptima selección de los valores más apropiados para los parámetros correspondientes a las tres contribuciones “P, I, y D”, como se señaló anteriormente esta selección no resulta siempre tan simple y requiere un conocimiento detallado del proceso a controlar.

Después de un desarrollo matemático del sistema y con la ayuda del programa Matlab, como se muestra en el capítulo 4 de este documento, se obtuvo los parámetros iniciales para la sintonización, que fueron refinados posteriormente hasta conseguir los objetivos planteados de control.

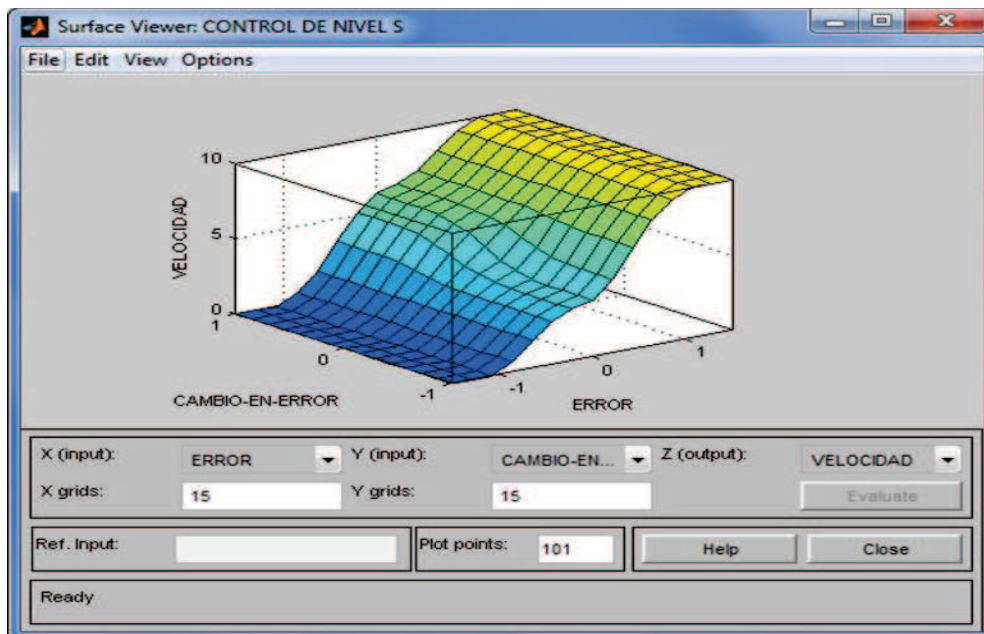
**Tabla 5.1.** Parámetros para sintonización final del lazo de control PID

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS PARA SINTONIZACIÓN FINAL DEL LAZO DE CONTROL PID</b>		
<b>Kp</b>	<b>Ki</b>	<b>Kd</b>
8	25	0

El control difuso, ha demostrado ser muy eficiente al manipular procesos complejos y difíciles de modelar, busca reproducir o asemejar las capacidades y las acciones de control del operario humano. A diferencia de las estrategias de

control clásico como los algoritmos de control proporcional integral derivativo (pid), la flexibilidad de implementación y operación, así como la capacidad de adaptarse y controlar procesos que exhiben fuertes no linealidades, han sido las principales ventajas de las estrategias de control basadas en los algoritmos difusos.

Resumiendo la implantación del controlador difuso para el control de nivel de líquido en un tanque fue lograr que los sensores transmisores conviertan las magnitudes físicas mesurables en señales eléctricas, que son enviadas al módulo de fuzificación, el cual se encarga de convertir esas señales en valores difusos. Posteriormente, esos valores difusos pasan al motor de inferencia difusa, que se encarga de aplicar las reglas de implicación difusas que correspondan, generando así un conjunto difuso de salida, el cual recoge las decisiones que correspondan de acuerdo con los antecedentes entregados por el módulo de fuzificación. Entonces, la decisión difusa es enviada al módulo de defuzificación, que la convierte en una decisión concreta que pasará a actuar sobre el elemento final de control a manera de una señal de control, manipulando la variable de proceso de forma tal que se corrija el error presente. El modelo de controlador difuso tipo Sugeno seleccionado para este estudio es computacionalmente eficiente y trabaja bien optimizando sistemas no lineales.



**Figura 5.1.** Superficie de control

Para obtener los resultados de la simulación del sistema nivel con el controlador difuso se utilizó el módulo Fuzzy de MatLab que nos muestra el comportamiento del mismo y además nos proporciona un gráfico de la superficie de control resultante como se muestra en la figura 5.1 que nos permite optimizar el sistema.

La superficie de control muestra todos los posibles valores de respuesta del sistema ante cualquier combinación de entradas, obteniendo como se observa en la figura 5.1 superficies de control suave, que indican que la señal de control será poco oscilatoria, y a cambios pequeños en los valores de entrada, la salida tendría cambios pequeños. Mediante el análisis de la superficie de control se puede determinar para que combinación de entradas el comportamiento del sistema no es el deseado y corregirlo cambiando las reglas, operadores o funciones de pertenencia de las variables lingüísticas.



**Figura 5.2.** Tiempos de estabilización para una referencia de 15 cm.

Una vez logrados los objetivos de control para los controladores difuso y PID procedemos a comparar las características técnicas de cada uno de ellos a partir de los resultados obtenidos en el módulo, cabe destacar que todas las pruebas

realizadas se las realizo con la máxima carga, es decir en las condiciones más difíciles de trabajo.

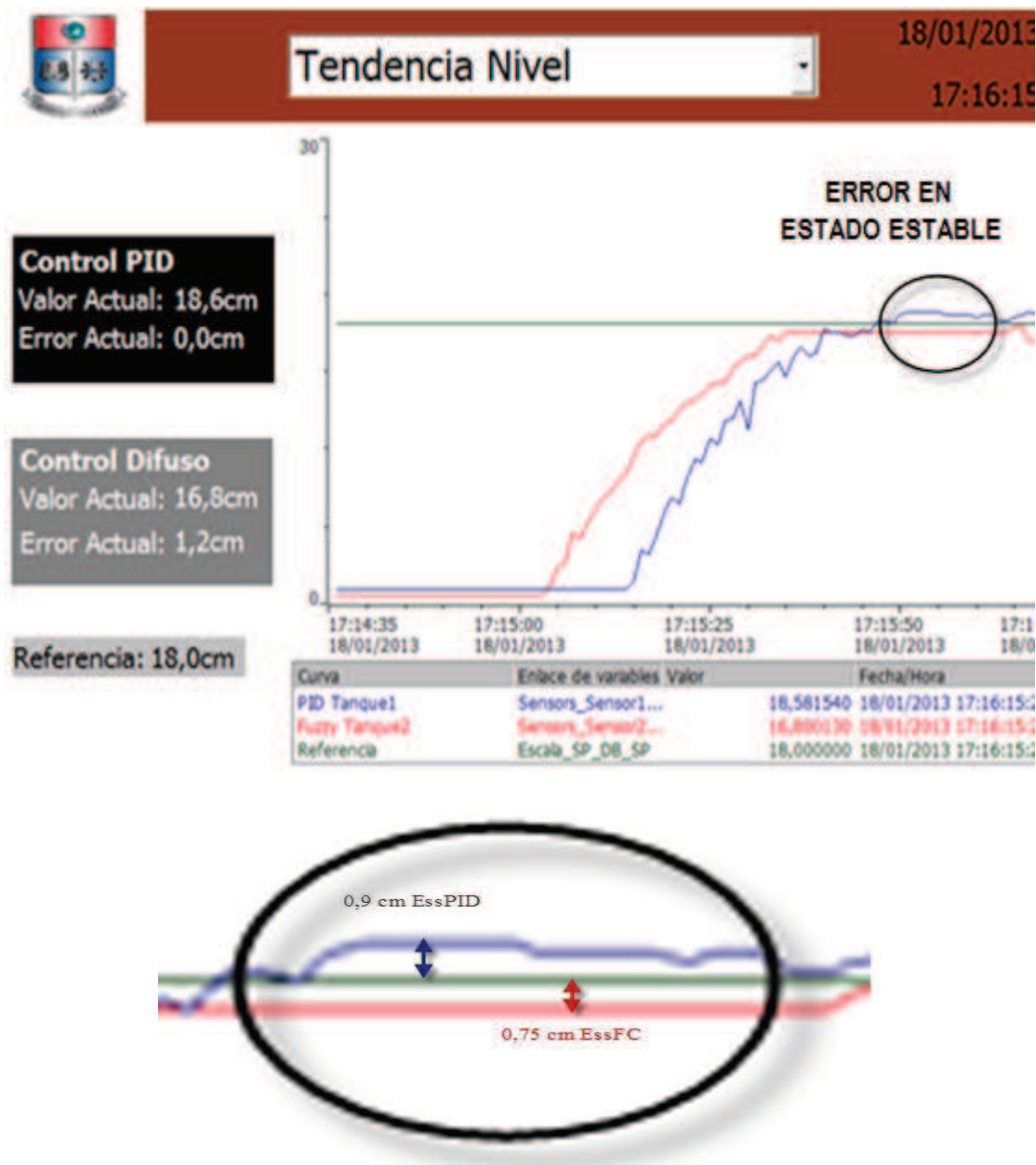


Figura 5.3. Error en estado estable control PID vs. Difuso

**Tiempo de estabilización (tss):** Se define como el tiempo tomado por la respuesta para alcanzar y permanecer dentro de un específico rango de error. Es usualmente expresado como porcentaje del valor final en estado estable, el error tolerable esta entre el 2-5% del valor final. De los resultados obtenidos se

observa que el control difuso presenta tiempos de estabilización menor que el control PID, como muestran en las figura 5.1 y 5.2. Esto es quizás la ventaja más importante de este tipo de control en esta aplicación específica.

**Error en estado estable (Ess).** Es la diferencia observada entre el valor final en estado estable y el valor deseado de la variable.

Como se aprecia en la Figura 5.3 ambos controles presentan valores muy pequeños de error en estado estable, sin embargo, el control difuso tiene un error más pequeño en la mayoría de los casos.

El control PID presentan una precisión bastante buena, sin embargo el control difuso presenta una precisión mayor, esto como reflejo directo del menor error en estado estable que presenta este control.



**Figura 5.4.** Tiempos de estabilización para una referencia de 18 cm.

**Sobre pico máximo (Mp):** Es el relación del valor pico máximo de la curva de respuesta al valor de la respuesta en estado estable. La figura 5.5 muestra una de las ventajas principales que presenta el control difuso sobre el PID, la cual se ve

reflejada en el sobrepico nulo, que asegura que este tipo de control nunca exceda la referencia.

$$M_{pPID} = \frac{Y_{max} - Y_{ss}}{Y_{ss}}$$

$$M_{pPID} = \frac{18,9 - 18}{18} = 0,05$$

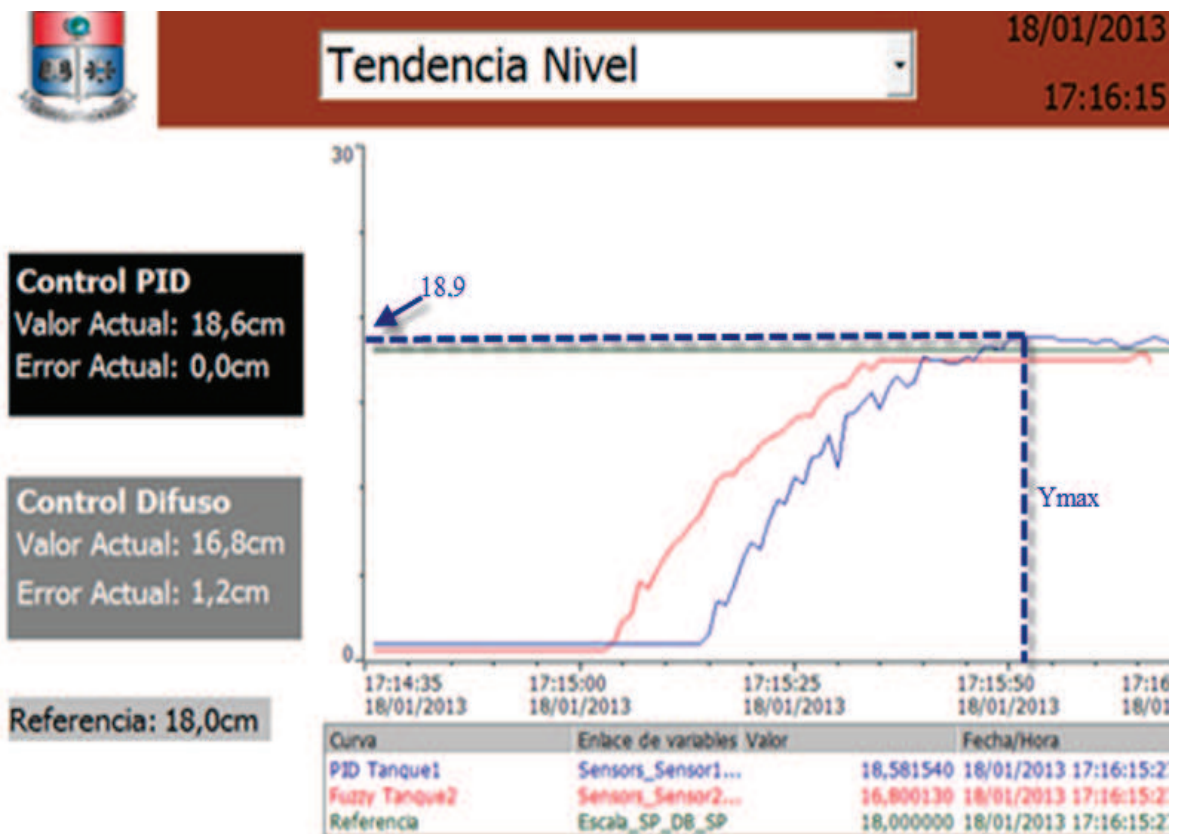


Figura 5.5. Sobrepico máximo en control PID

**Perturbacion.-** Es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada. Como muestra la figura 5.6, al realizar una perturbación al sistema cambiando la referencia deseada desde 15 a 18 cm, los resultados muestran que

el control Difuso responde mejor a las perturbaciones que el control PID, estabilizándose rápidamente.



Figura 5.6. Perturbaciones control PID vs. Difuso

Mientras estos factores son usados para caracterizar las condiciones técnicas que indicaran si el sistema de control está o no realizando el trabajo para que fue diseñado. Hay otras características que deben ser consideradas en el diseño de un controlador.

**Costo.-** Es importante tener en cuenta que para la implementación de sistemas de control difuso empleando autómatas programables hasta ahora había que incorporar un módulo de procesamiento difuso, estos módulos normalmente suelen ser costosos y se encuentran limitados en cuanto al número de funciones de pertenencia y operadores entre otros. Con este trabajo se pretende demostrar



que se puede implementar tantos controladores difusos como se quiera, sin incrementar ostensiblemente el costo de la implementación del sistema.

**Complejidad computacional.-** En este documento se especifica la forma de implementar un controlador difuso tipo Takagi-Sugeno en un PLC S7-1200, la elección del esquema Takagi-Sugeno se debe a su menor costo computacional comparado con el sistema difuso tipo Mandami, además se debe notar que mientras el controlador PID necesita procesar todo un algoritmo de control, el controlador difuso procesa rápidamente el programa desarrollado, usando menos recursos de memoria y funciones del PLC.

**Dificultad de implementación.-** El PLC como herramienta industrial puede ser utilizado para desarrollar sistemas de control avanzados. El trabajo desarrollado en esta tesis constituye una aportación significativa a la implementación en el control en tiempo real mediante un controlador difuso, aprovechando el estándar IEC 61131-3 presente en la mayor parte de los PLC actuales, permite la implementación final de un controlador difuso en un controlador lógico programable, sin dificultar su implementación.

**Rendimiento.-** Durante el proceso de desarrollo del módulo, y durante todas las pruebas realizadas el control difuso tanto como el control PID cumplieron con todos los objetivos planteados, presentando gran capacidad de seguimiento de la referencia, logrando una gran confiabilidad en el control de nivel de líquido.

**Adaptabilidad.-** La estructura del controlador difuso propuesta en este trabajo permite su fácil adaptación a nuevos problemas ahorrando tiempo en el desarrollo del controlador.

# CAPÍTULO 6

## 6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1.1 CONCLUSIONES

En los últimos años los sistemas difusos se han venido consolidando como una herramienta útil para tratar y modelar sistemas complejos y no lineales. Especialmente en áreas como el control, en el procesamiento de imágenes, la robótica y la electrónica de consumo.

El control difuso ha sido incorporado en un gran número de productos y procesos. Como por ejemplo: En el control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Se ha aplicado en sistemas de vehículos espaciales, guiado de misiles, robótica, etc.

La lógica difusa provee un método completamente diferente de solucionar un problema de control, enfocándose en lo que el sistema debe hacer más que en tratar de entender como este trabaja. El diseñador puede concentrarse en resolver el problema más que en tratar de modelar matemáticamente el sistema, si esto fuera posible.

Es necesario que al implementar un controlador difuso se realice un pre-procesamiento de los datos de entrada y un post procesamiento de los datos de salida, las operaciones más comunes son, escalamiento, normalizado, filtrado, integración, y derivación entre otras. El tipo de preprocesado y postprocesado determina la clase de controlador, e influye en forma considerable en sus propiedades y capacidades.

Al momento de definir las variables de entrada del sistema difuso, se debe tratar de emplear el número mínimo de variables que provean máxima información, si se usan más variables de las necesarias el control crecerá en complejidad y no se logrará una mejora significativa en su desempeño.

En la etapa de diseño del controlador hay numerosas variables a determinar, las principales son, tipo de pre y post procesado, funciones de membresía de la entrada (tipo, rangos, cantidad) tipo de reglas, definición de operadores, método de inferencia, y método de defuzificación. La definición de todas estas partes del controlador es en muchos casos un proceso de prueba y error ya que no existen reglas claras para su determinación.

Se ha demostrado que se puede implementar un controlador basado en Lógica difusa en un PLC, para realizar control de sistemas lineales o no lineales.

De esta investigación se desprende que no existe limitaciones a la capacidades que tiene un PLC para realizar control discreto en un tiempo lo suficientemente corto (tiempo real). Esto con el fin de poder implementar controladores avanzados para procesos complejos en la industria, aprovechándose los equipos instalados, sin necesidad de requerir de un controlador especial.

El PLC como herramienta industrial puede ser utilizado para desarrollar sistemas de control avanzados.

El Control difuso provee una respuesta satisfactoria, rápida y estable para el sistema desarrollado, cuando es sometido a diferentes tipos de perturbaciones.

El Controlador Difuso tiene un tiempo de respuesta rápido, un sobrepico mínimo y sigue fielmente la referencia, condición deseable en un sistema de control.

Otra característica de los controladores difusos es que son bastante intuitivos: la posibilidad de usar expresiones con imprecisión genera modelos intuitivos.

No necesita un modelo matemático preciso del sistema a controlar: permite controlar sistemas que son imposibles de controlar con sistemas de control clásicos. Permiten gran precisión: similar al sistema no difuso.

Es posible obtener prototipos, rápidamente, ya que no requiere conocer todas las variables acerca del Sistema antes de empezar a trabajar.

Una desventaja del control difuso es que si se desea que el sistema de control tenga flexibilidad de adaptaciones a los cambios del sistema y aprenda de los errores cometidos, serán necesarios muchos más cálculos adicionales, que también aumentan el tiempo de respuesta. Evidentemente estas opciones influyen en el costo del sistema final, y en muchos casos será la mayor restricción de diseño.

Mientras que el control convencional está profundamente arraigado y ha podido resolver la mayoría de los problemas de control con un mínimo costo, existiendo poca incentivo para cambiar el control convencional en aplicaciones donde este no responde de modo satisfactorio, por un control que se suponía más complejo, esperamos con el desarrollo de esta tesis poder cambiar esta percepción, demostrando las bondades del control difuso, no pretendiendo en ningún caso sustituir los controladores PID con controladores difusos, al contrario complementarlos y contribuir a encontrar su verdaderos campos de aplicación.

### **6.1.2 RECOMENDACIONES**

El control con sistemas expertos representa un paso adelante en el estudio del control de sistemas pero muchas aplicaciones aún están por ser desarrolladas, en particular, se recomienda poner énfasis en el desarrollo y estudio de la lógica difusa en funciones de control de alto nivel que caen fuera del dominio de los métodos de control convencional, como son las aplicaciones donde la lógica difusa es usada para control supervisorio o la evaluación del rendimiento de los controladores.

Se recomienda implementar un control de alta precisión, tal como estabilidad de un péndulo, por ejemplo, para que al igual que se realizó en esta tesis comparar sus respuestas, allí se encontrará que los tiempos de respuesta de un control PID versus un difuso hacen que el difuso sea el único que pueda estabilizar este tipo de aplicaciones, además se debe tomar en cuenta que allí se debe considerar el uso de un PLC de gama alta ya que tiene asistentes para el desarrollo de lógica difusa, en Siemens los PLC S7-300 y S7-400.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUINAGA, A. (2006). *Automatización Industrial*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- ALCÁNTARA, A. H. (Abril de 2007). Control Difuso vs. Control PID Análisis y Simulación Numérica. Pachuca de Soto: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- ALVAREZ LOPEZ, I. (2006). *Aportaciones al Diseño e Implantación de Controladores Difusos. Aplicación al curado del Tabaco de Hoja*. Granada: Tesis Doctoral Universidad Granada. E.T.S. De Ingenierías Informática y de Telecomunicaciones.
- CREUS, A. (1998). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Alfaomega.
- DANIELA SOFÍA GARCÉS, J. S. (Marzo de 2009). Diseño Programación y construcción del control de un sistema Hidráulico de Nivel. Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- DRIANKO, D. M. (1993). *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer-Verlag.
- KEVIN M. PAZINO, S. Y. (1998). *Fuzzy Control*. Ohio.
- MIGUEL ANGEL RAMÍREZ, F. G. (2005). Aplicación de la Logica difusa al control de un Pozo de Petróleo actuado con una bomba de cavidad progresiva. Venezuela.
- OGATA, K. (1987). *Dinámica de Sistemas*. México D.F.: Pearson Education of Mexico.
- OGATA, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. México: Prentice-Hall Hispanoamerica.
- ORTIZ DE LA VEGA, H. A. (2009). *Algoritmos Simples para Sintonización de Controladores Difusos*. México df.: Dirección de Postgrado e Investigación Universidad La Salle.
- POMARES, H. (1999). *Nueva Metodología par el diseno automatico de sistemas difusos*. Tesis Doctoral UGR.

S.N. SIVANANDAM, S. S. (2004). *Introduction to fuzzy Logic using MathLab*.  
Mombai.

W., B. (2004). *Instrumentation and Control System*. Elsevier Science & Tecnology  
Books.

# ANEXO I

## DESCRIPCIÓN DE LA NORMA IEC 61131

Se describe el trabajo desarrollado en esta norma en dos partes:

- Elementos comunes
- Lenguajes de programación

### ELEMENTOS COMUNES

#### TIPOS DE DATOS

Dentro de los elementos comunes, se definen los tipos de datos. Los tipos de datos previenen de errores en una fase inicial, como por ejemplo la división de un dato tipo fecha por un número entero. Los tipos comunes de datos son: variables booleanas, número entero, número real, byte y palabra, pero también fechas, horas del día y cadenas (strings).

Basado en estos tipos de datos, el usuario puede definir sus propios tipos de datos, conocidos como tipos de datos derivados. De este modo, se puede definir por ejemplo un canal de entrada analógica como un tipo de dato.

#### VARIABLES

Las variables permiten identificar los objetos de datos cuyos contenidos pueden cambiar, por ejemplo, los datos asociados a entradas, salidas o a la memoria del autómata programable. Una variable se puede declarar como uno de los tipos de datos elementales definidos o como uno de los tipos de datos derivados. De este modo se crea un alto nivel de independencia con el hardware, favoreciendo la reusabilidad del software.

La extensión de las variables está normalmente limitada a la unidad de organización en la cual han sido declaradas como locales. Esto significa que sus nombres pueden ser reutilizados en otras partes sin conflictos, eliminando una frecuente fuente de errores. Si las variables deben tener una extensión global, han de ser declaradas como globales utilizando la palabra reservada VAR\_GLOBAL.



Pueden ser asignados parámetros y valores iniciales que se restablecen al inicio, para obtener la configuración inicial correcta.

## **CONFIGURACIÓN, RECURSOS Y TAREAS**

Al más alto nivel, el elemento software requerido para solucionar un problema de control particular puede ser formulado como una configuración. Una configuración es específica para un tipo de sistema de control, incluyendo las características del hardware: procesadores, direccionamiento de la memoria para los canales de I/O y otras capacidades del sistema.

Dentro de una configuración, se pueden definir uno o más recursos. Se puede entender el recurso como un procesador capaz de ejecutar programas IEC.

Con un recurso, pueden estar definidas una o más tareas. Las tareas controlan la ejecución de un conjunto de programas y/o bloques de función. Cada una de ellos puede ser ejecutado periódicamente o por una señal de disparo especificada, como el cambio de estado de una variable.

Los programas están diseñados a partir de un diferente número de elementos de software, escrito en algunos de los distintos lenguajes definidos en IEC 61131-3. Típicamente, un programa es una interacción de Funciones y Bloques Funcionales, con capacidad para intercambiar datos. Funciones y bloques funcionales son las partes básicas de construcción de un programa, que contienen una declaración de datos y variables y un conjunto de instrucciones.

Comparado esto con un PLC convencional, éste contiene un solo recurso, ejecutando una tarea que controla un único programa de manera cíclica. IEC 61131-3 incluye la posibilidad de disponer de estructuras más complejas. El futuro que incluye multi-procesamiento y gestión de programas por eventos ¡Y no está muy lejos!, observar simplemente las características de los sistemas distribuidos o los sistemas de control de tiempo real. IEC 61131-3 está disponible para un amplio rango de aplicaciones, sin tener que conocer otros lenguajes de programación adicionales.

## **UNIDADES DE ORGANIZACIÓN DE PROGRAMA**

Dentro de IEC 1131-3, los programas, bloques Funcionales y funciones se denominan Unidades de Organización de Programas, POU's.

- **Funciones**

IEC 61131-3 especifica funciones estándar y funciones definidas por usuario. Las funciones estándar son por ejemplo ADD (suma), ABS (valor absoluto), SQRT (raíz cuadrada), SIN (seno), y COS (coseno). Las funciones definidas por usuario, una vez implementadas pueden ser usadas indefinidamente en cualquier POU.

Las funciones no pueden contener ninguna información de estado interno, es decir, que la invocación de una función con los mismos argumentos (parámetros de entrada) debe suministrar siempre el mismo valor (salida).

- **Bloques Funcionales, FB's**

Los bloques funcionales son los equivalentes de los circuitos integrados, IC's, que representan funciones de control especializadas. Los FB's contienen tanto datos como instrucciones, y además pueden guardar los valores de las variables (que es una de las diferencias con las funciones). Tienen un interfaz de entradas y salidas bien definido y un código interno oculto, como un circuito integrado o una caja negra. De este modo, establecen una clara separación entre los diferentes niveles de programadores, o el personal de mantenimiento. Un lazo de control de temperatura, PID, es un excelente ejemplo de bloque funcional. Una vez definido, puede ser usado una y otra vez, en el mismo programa, en diferentes programas o en distintos proyectos. Esto lo hace altamente reutilizable.

Los bloques funcionales pueden ser escritos por el usuario en alguno de los lenguajes de la norma IEC, pero también existen FB's estándar (biestables, detección de flancos, contadores, temporizadores, etc.). Existe la posibilidad de ser llamados múltiples veces creando copias del bloque funcional que se denominan instancias. Cada instancia llevará asociado un identificador y una estructura de datos que contenga sus variables de salida e internas.

- **Programas**

Los programas son “un conjunto lógico de todos los elementos y construcciones del lenguaje de programación que son necesarios para el tratamiento de señal previsto que se requiere para el control de una máquina o proceso mediante el sistema de autómatas programables”. Un programa puede contener, aparte de la declaración de tipos de datos, variables y su código interno, distintas instancias de funciones y bloques funcionales.

### **GRAFICO DE FUNCIÓN SECUENCIAL**

SFC describe gráficamente el comportamiento secuencial de un programa de control. Esta definición deriva de las Redes de Petri y Grafset (IEC 848), con las modificaciones adecuadas para convertir las representaciones de una norma de documentación en un conjunto de elementos de control de ejecución para una POU de un autómatas programables. SFC ayuda a estructurar la organización interna de un programa, y a descomponer un problema en partes manejables, manteniendo simultáneamente una visión global. Los elementos del SFC proporcionan un medio para subdividir una POU de un autómatas programables en un conjunto de etapas y transiciones interconectadas por medio de enlaces directos. Cada etapa lleva asociados un conjunto de bloques de acción y a cada transición va asociada una condición de transición que cuando se cumple, causa la desactivación de la etapa anterior a la transición y la activación de la siguiente. Los bloques de acción permiten realizar el control del proceso. Cada elemento puede ser programado en alguno de los lenguajes IEC, incluyéndose el propio SFC. Dado que los elementos del SFC requieren almacenar información, las únicas POU's que se pueden estructurar utilizando estos elementos son los bloques funcionales y los programas.

Se pueden usar secuencias alternativas y paralelas, comúnmente utilizadas en muchas aplicaciones. Debido a su estructura general, de sencilla comprensión, SFC permite la transmisión de información entre distintas personas con distintos niveles de preparación y responsabilidad dentro de la empresa.

### **LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN**

Se definen cuatro lenguajes de programación normalizados. Esto significa que su sintaxis y semántica ha sido definida, no permitiendo particularidades distintivas

(dialectos). Una vez aprendidos se podrá usar una amplia variedad de sistemas basados en esta norma.

Los lenguajes consisten en dos de tipo literal y dos de tipo gráfico:

Literales:

- Lista de instrucciones (IL).
- Texto estructurado (ST).

Gráficos:

- Diagrama de contactos (LD).
- Diagrama de bloques funcionales (FBD).

La elección del lenguaje de programación depende de:

- los conocimientos del programador,
- el problema a tratar,
- el nivel de descripción del proceso,
- la estructura del sistema de control,
- la coordinación con otras personas o departamentos.

Los cuatro lenguajes están interrelacionados y permiten su empleo para resolver conjuntamente un problema común según la experiencia del usuario.

El Diagrama de contactos (LD) tiene sus orígenes en los Estados Unidos. Está basado en la presentación gráfica de la lógica de relés. Lista de Instrucciones (IL) es el modelo de lenguaje ensamblador basado un acumulador simple; procede del alemán 'Anweisungsliste, AWL.

El Diagramas de Bloques Funcionales (FBD) es muy común en aplicaciones que implican flujo de información o datos entre componentes de control. Las funciones y bloques funcionales aparecen como circuitos integrados y es ampliamente utilizado en Europa.

El lenguaje Texto estructurado (ST) es un lenguaje de alto nivel con orígenes en el Ada, Pascal y 'C'; puede ser utilizado para codificar expresiones complejas e

instrucciones anidadas; este lenguaje dispone de estructuras para bucles (REPEAT-UNTIL; WHILE-DO), ejecución condicional (IF-THEN-ELSE; CASE), funciones (SQRT, SIN, etc.).

## ANEXO II

### MANUAL DE USUARIO

Se debe tomar en cuenta el siguiente manual para la correcta operación del panel táctil KTP600 PN que se encuentra como interfaz gráfica HMI (interfaz humano máquina) en la comparación de control PID y Difuso para controlar nivel.

#### Información Importante:

##### Simbología



Procedimiento de personal especializado.



Atención. Observación crítica del sistema.



Información de Internet.

#### Botones comunes

Se usan los botones de membrana para algunas operaciones importantes de la interfaz, de izquierda a derecha se tiene: **Pantalla Principal**, **Ventana de Avisos No Acusados**, **Diálogo de Inicio de Sesión**, **Comutación de Idioma**, **Activar la Imagen Anterior** y **Parar la Aplicación**, para visualizar los botones, favor visualizar la Figura 1.



INICIO AVISOS SESIÓN IDIOMA ANTERIOR APAGAR

**Figura 1.** Botones de membrana del panel táctil y su representación

## Navegación

Así como se debe tener en cuenta el manejo de la navegación mediante el uso del menú de texto que se encuentra en la parte superior de la pantalla, ver Figura 2, en la misma se puede desplegar todas las pantallas a las que se puede acceder dentro del programa desarrollado.

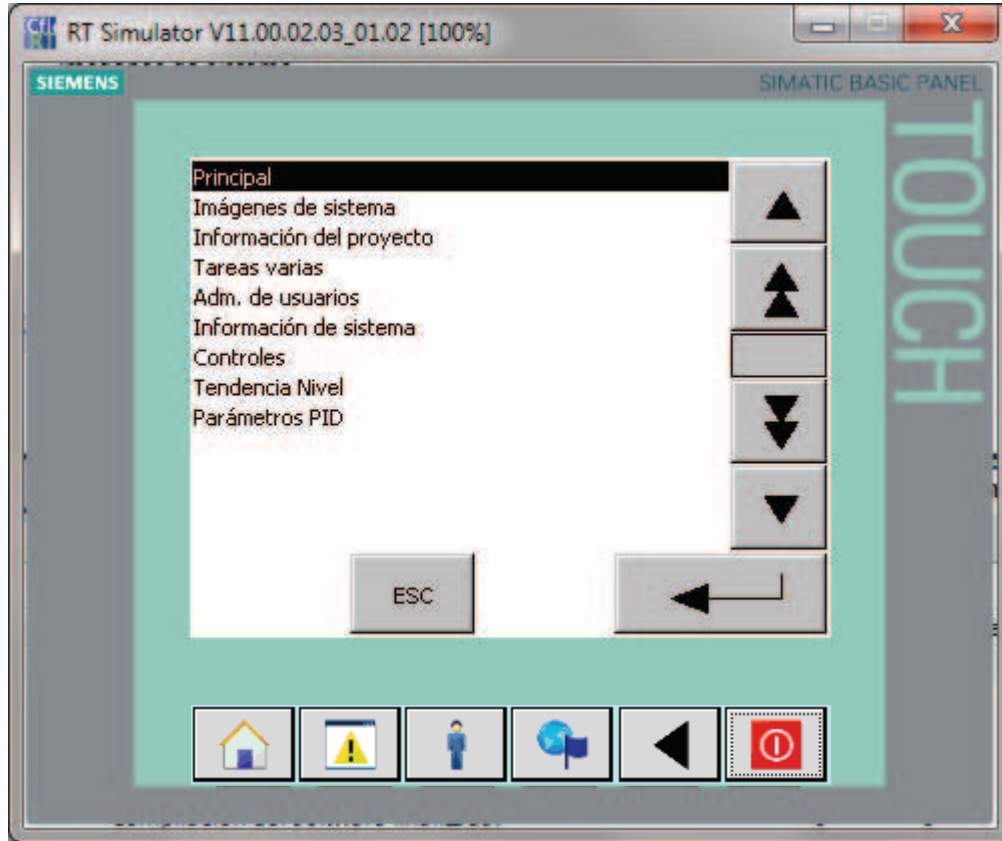


Figura 2. Manejo de la lista de texto y despliegue de menú de navegación de pantallas

## Inicio de sesión



Todo botón que se encuentre subrayado tiene un bloqueo porque puede perturbar el sistema o la estabilidad del control de nivel realizado, sólo puede ser operado por un administrador. El panel se encuentra con el *usuario: Administrador* y la *contraseña: 123* para operación, ver Figura 3.

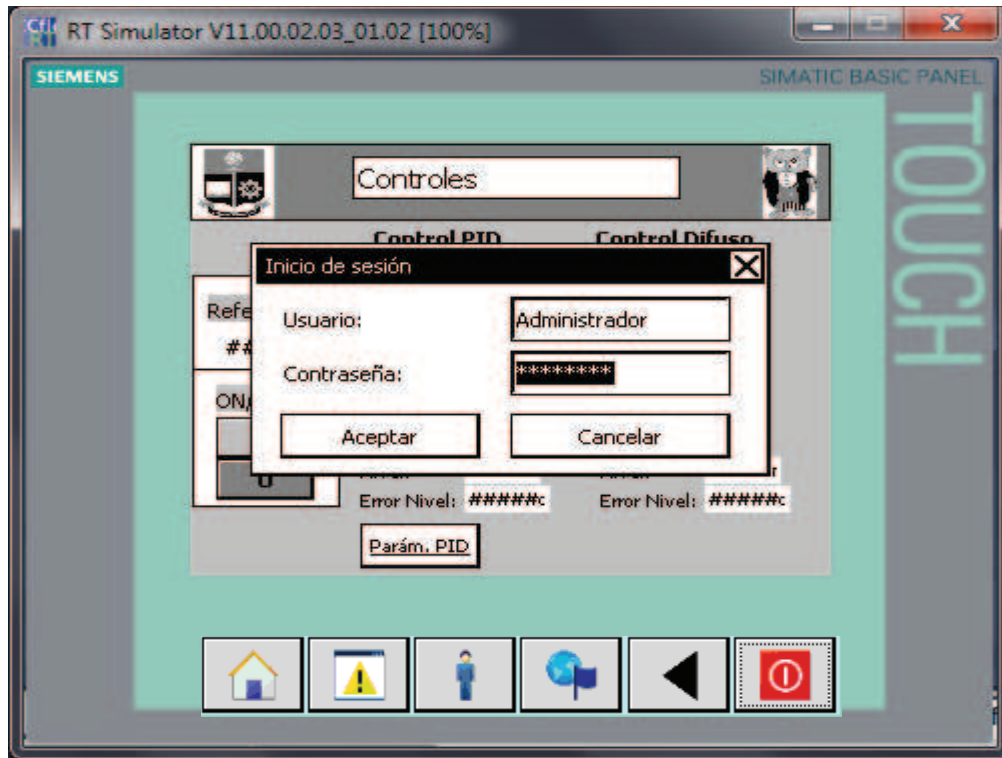


Figura 3. Inicio de sesión

## Manejo de las Pantallas

### Pantalla Principal

En la pantalla principal, Figura 4, se encuentra el menú principal, donde se selecciona entre los siguientes botones: **Controles**, **Tendencia de Nivel** y **Sistema**.



Figura 4. Pantalla Principal



## Pantalla Controles

La pantalla controles maneja lo correspondiente a la referencia de nivel, encendido y apagado de los controladores, nivel actual y error de nivel. Adicionalmente se tienen barras que muestran en nivel actual en tiempo real de cada uno de los tanques tal como se puede ver en la Figura 5.

En el control PID se tiene el botón de navegación **Parámetros PID** para poder editarlos y visualizarlos en línea.

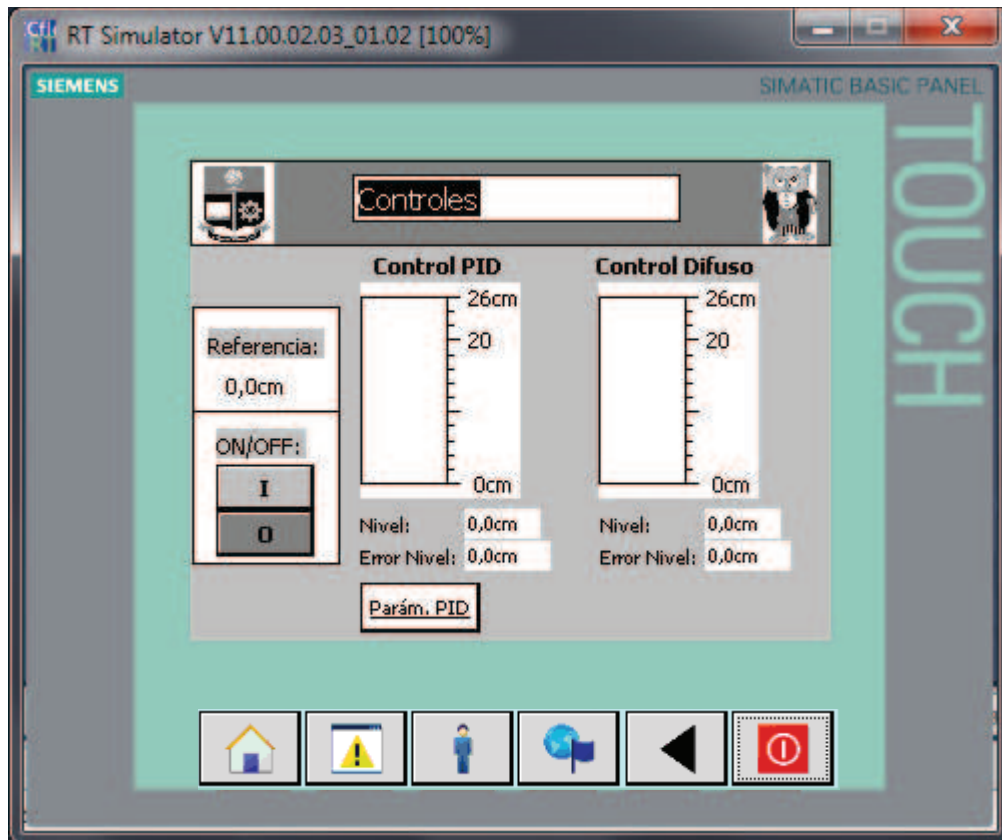


Figura 5. Pantalla Controles



## Pantalla Parámetros PID

La pantalla Parámetros PID muestra en tiempo real las constantes ( $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ ) con las que se sintoniza en ese momento al control PID del módulo, ver Figura 6, así como se tiene la visualización del valor de proceso actual, el valor de la salida de manera porcentual, estas dos medidas se las puede monitorear en barras donde se mejora la representación del sistema.

**Se recomienda que estos valores sean ajustados por personal calificado para no comprometer el comportamiento normal y estable de la planta.**

**¡Si no se estabiliza con los nuevos parámetros ingresados, favor volver a los parámetros iniciales, tabla 1!**

Parámetros PID

Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 8.84

Tiempo de integración: 25.64 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 0.8

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 3.000116E-1 s

**Regla para la optimización**

Estructura del regulador: PI

Tabla 1. Parámetros luego de la auto sintonía del PID

Se tiene el botón **AUTO/MANUAL**, donde se puede manejar la salida porcentual tanto de manera manual o automática del PID, por ejemplo, si se pone al 100% de manera manual, el actuador va a ir al máximo de su capacidad.

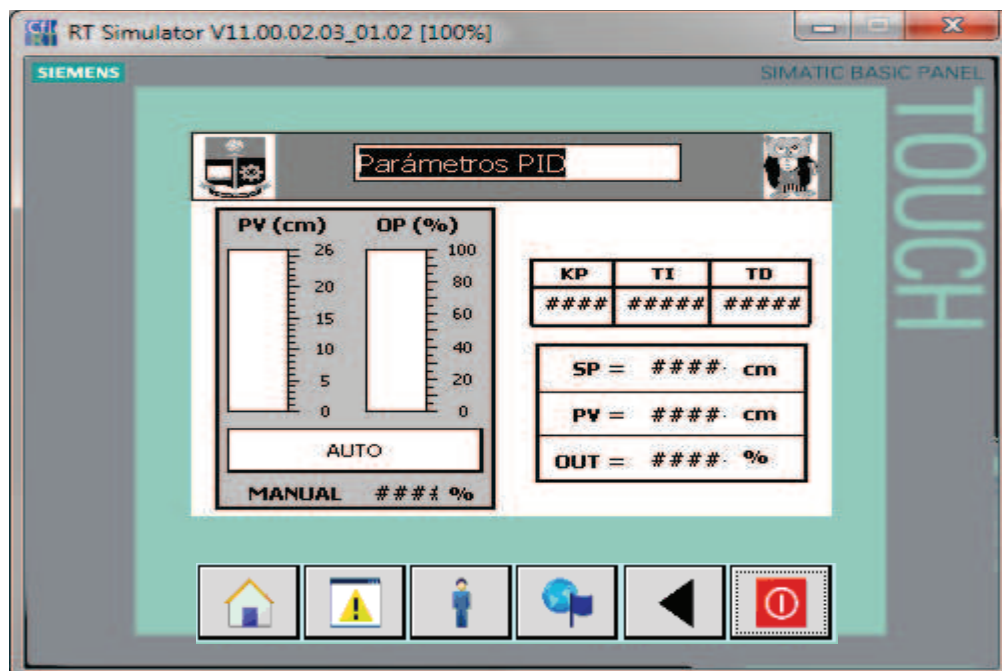


Figura 6. Pantalla Parámetros PID

## Pantalla Tendencia de Nivel

En la pantalla tendencia de nivel se tiene la visualización de las curvas en tiempo real de las siguientes variables: Referencia, valor actual control PID y valor actual control difuso, así como se puede ver las variables de error tanto del control PID y difuso, sabiendo que el error es la diferencia entre la referencia y el valor actual, ver Figura 7.

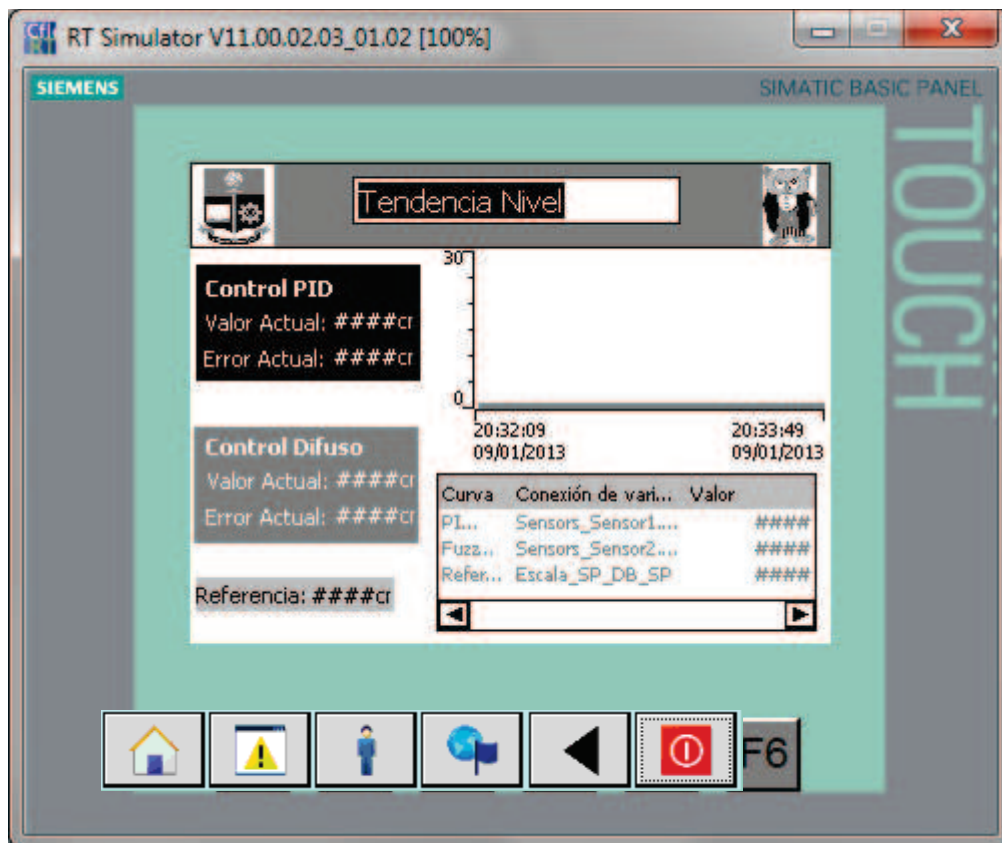


Figura 7. Pantalla Tendencia de Nivel



Se visualizan las curvas en tonos de grises, el color **negro** es el control PID, el control difuso posee un color **gris** y la referencia un color **gris claro**.

## Imágenes del sistema

Las imágenes de sistema, Figura 8, son pantallas donde se manejan ciertos parámetros del sistema del panel táctil tales como: **Información del Proyecto**, **Información del Sistema**, **Tareas Varias** y **Administración de Usuarios**.



**Figura 8.** Pantalla Imágenes de Sistema

## Administración de usuarios



Esta es una ventana muy importante, pues el administrador puede crear usuarios para la navegación del panel, así como le puede dar un tiempo de desconexión automática para su gestión, así como puede borrar los usuarios del sistema. Ver Figuras 9 y 10.

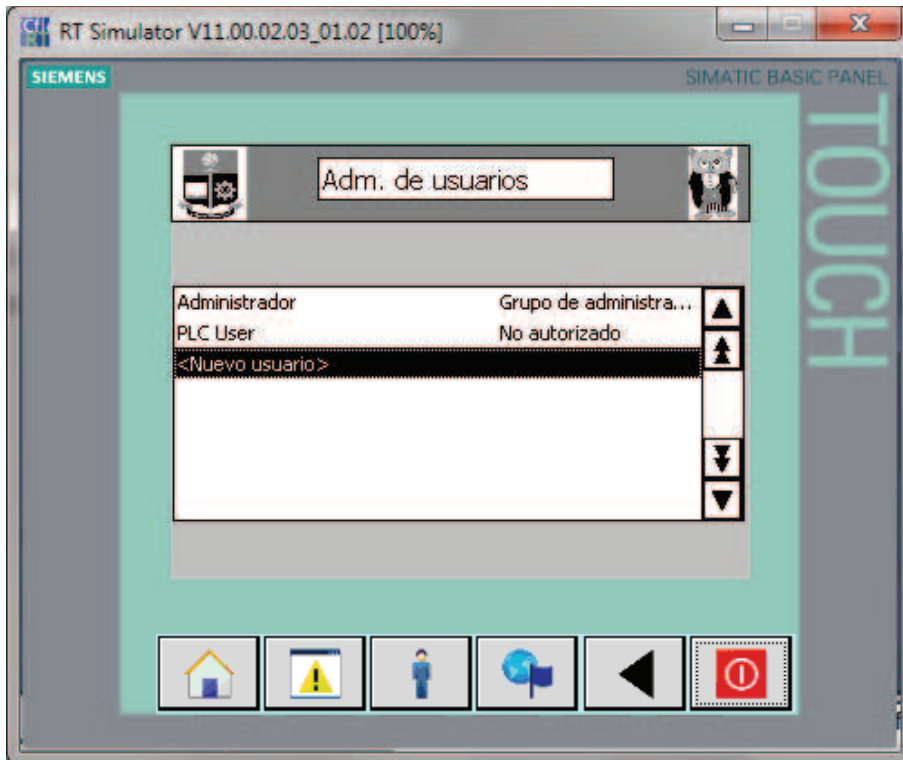


Figura 9. Pantalla Administración de usuarios

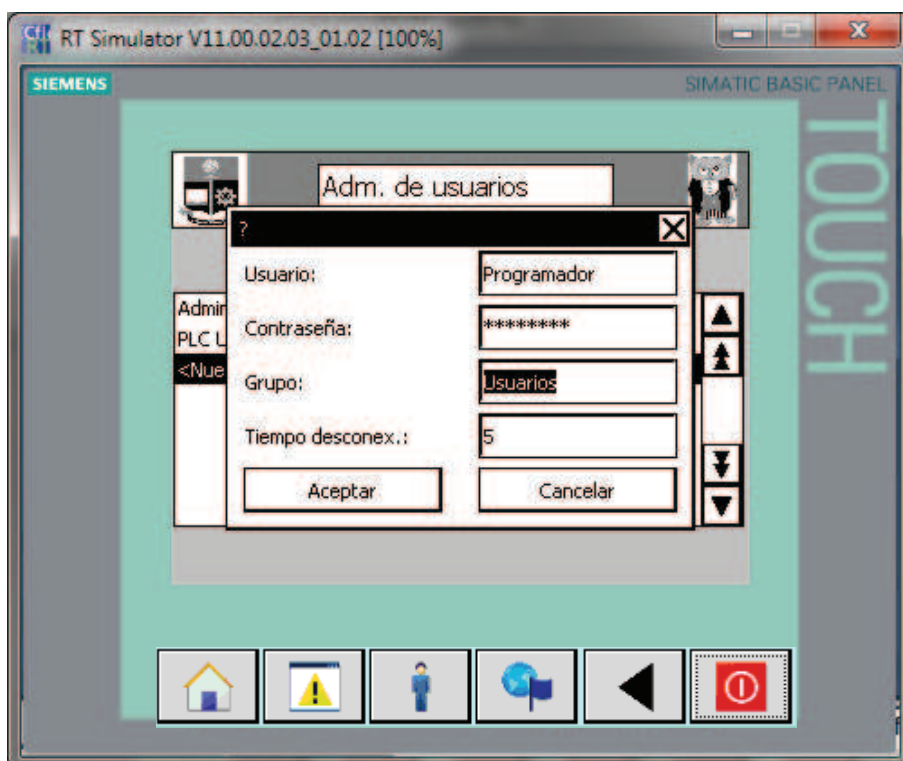


Figura 10. Creación de un nuevo usuario

## Funciones del panel

### Visualizador de alarmas

La visualización de alarmas aparece automáticamente cuando se genera un aviso, ver Figura 11, por ejemplo cuando se activa el paro de emergencia, esto genera automáticamente el despliegue de esta ventana con el aviso, el cual se borra una vez eliminada la generación del aviso.

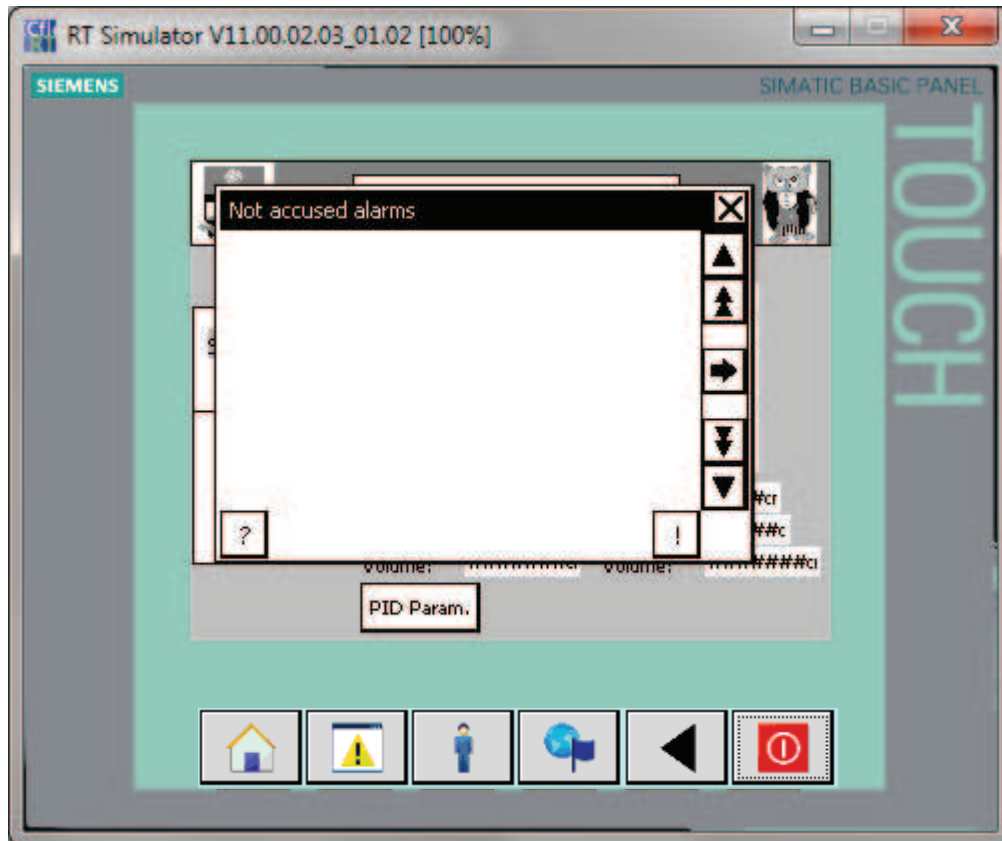


Figura 11. Visualizador de avisos no acusados

### Cambio de idioma

El panel posee la opción de cambio de lenguaje español a inglés o viceversa, haciendo que el panel sea más universal y estandarizado, requerimiento indispensable para la industria, ver Figura 12.

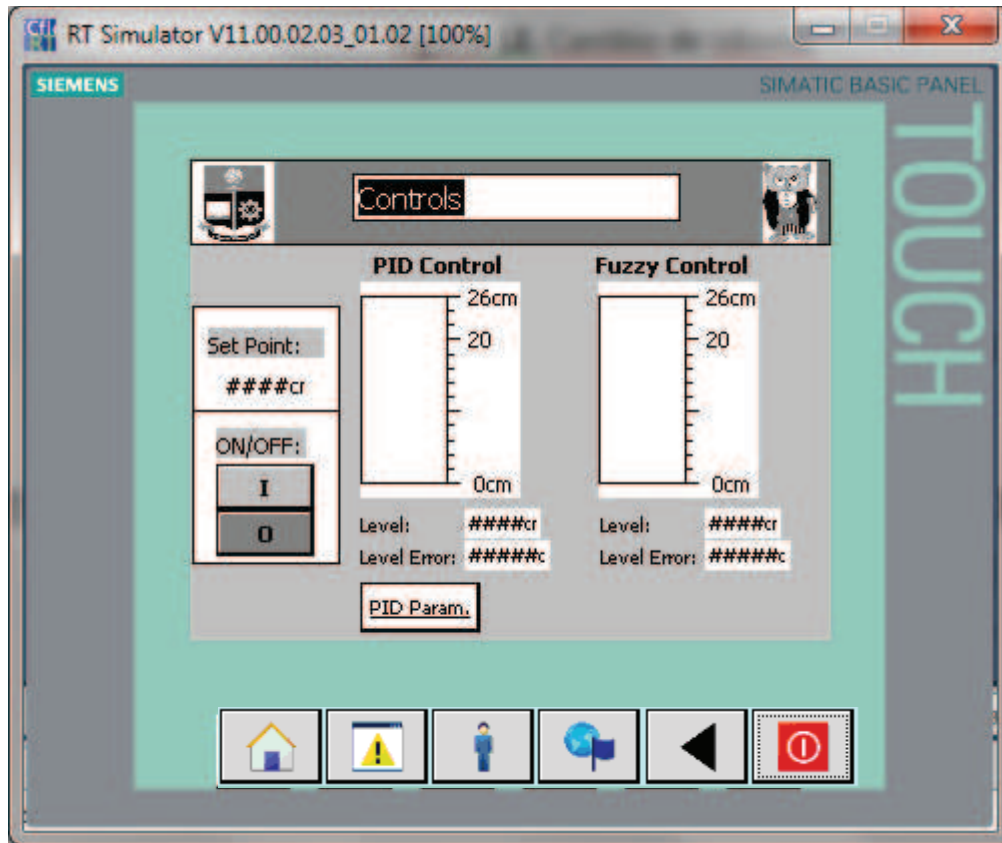


Figura 12. Cambio de Idioma

## Soporte

Para cualquier cambio en la configuración de hardware o software del sistema de control de nivel se debe observar las ayudas en línea que presenta la empresa Siemens en Latinoamérica y en el mundo con la página:



[www.support.automation.siemens.com](http://www.support.automation.siemens.com)

Así como el teléfono de soporte técnico andino (HOT Line Siemens Técnica), donde sin costo alguno se puede realizar consultas técnicas de los diversos productos Siemens en el área de automatización y variadores A&D (*Automation and Drives*):

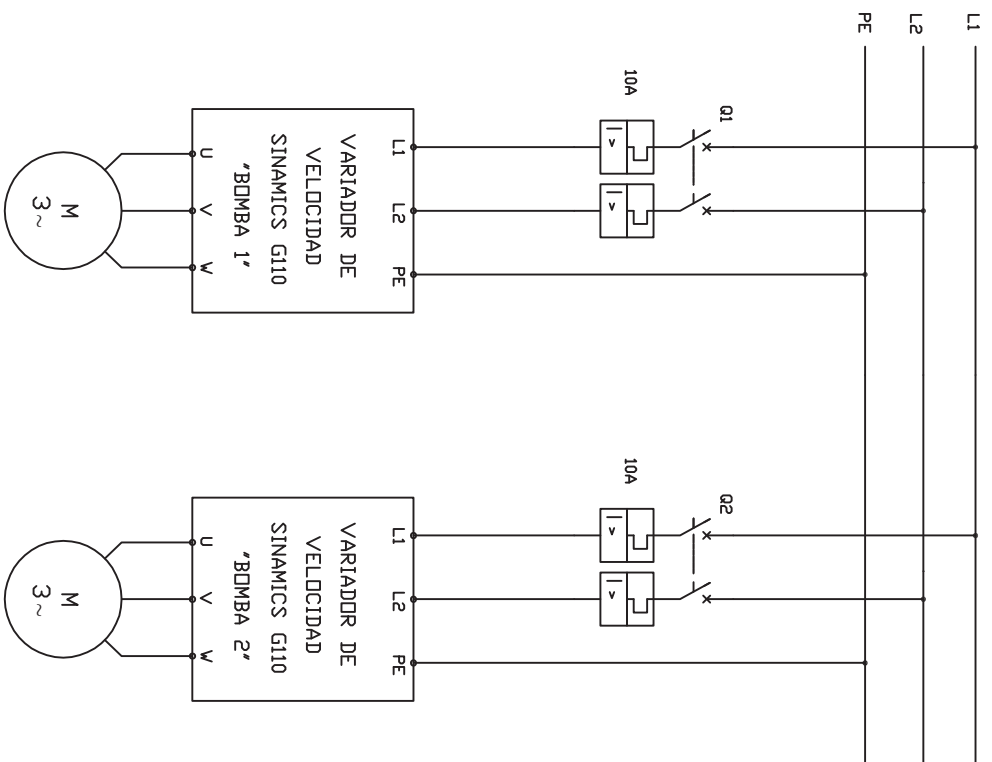
1800 101-555 en Ecuador

Otra opción es consultar cualquier proveedor de soluciones autorizado (Solution Partner Siemens) a nivel mundial, en el campo de micro automatización, referente a aplicaciones con PLC gama media S7-1200 y paneles básicos KTP con los cuales se encuentra desarrollado el sistema de control.

## **ANEXO III**

### **PLANOS ELÉCTRICOS**



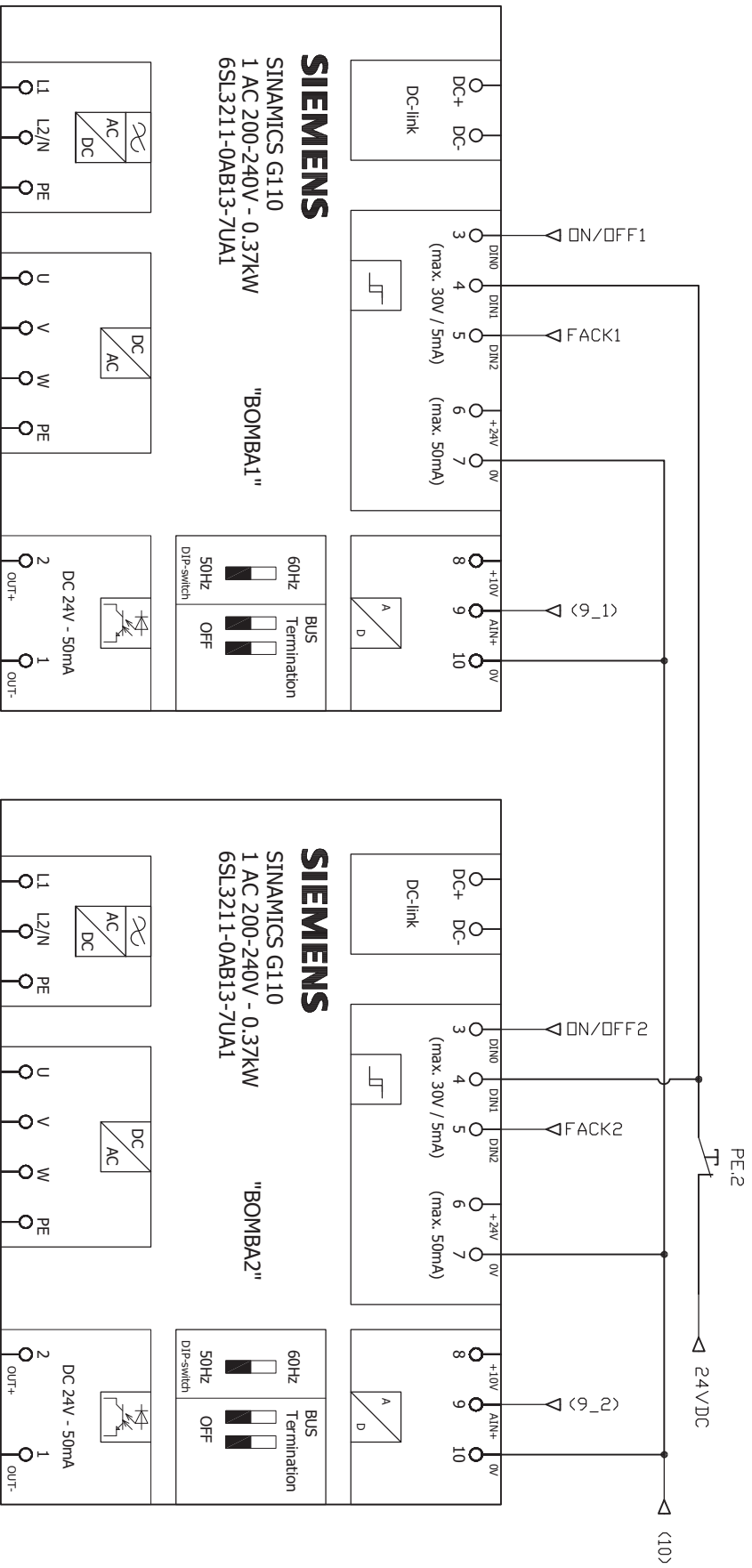


NOTAS GENERALES		REVISIONES		INGENIERIA/CONTROLADO		FIRMA		FECHA	
NUMERO	DESCRIPCION	REV	ENTIDAD PARA REVISION INTERNA	FECHA ELABORADO	FECHA REVISADO	ING. DE DISEÑO	REVISADO POR	GERENTE TECNICO	APROBACION DEL CLIENTE
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									



CLIENTE		PROYECTO	
TAMBO	AA	DESCRIPCION	Diagrama de fuerza
ESCALA	5/8	DIBUJO No.	FRA_053_01
		Hojas	1 DE 4
		REV	



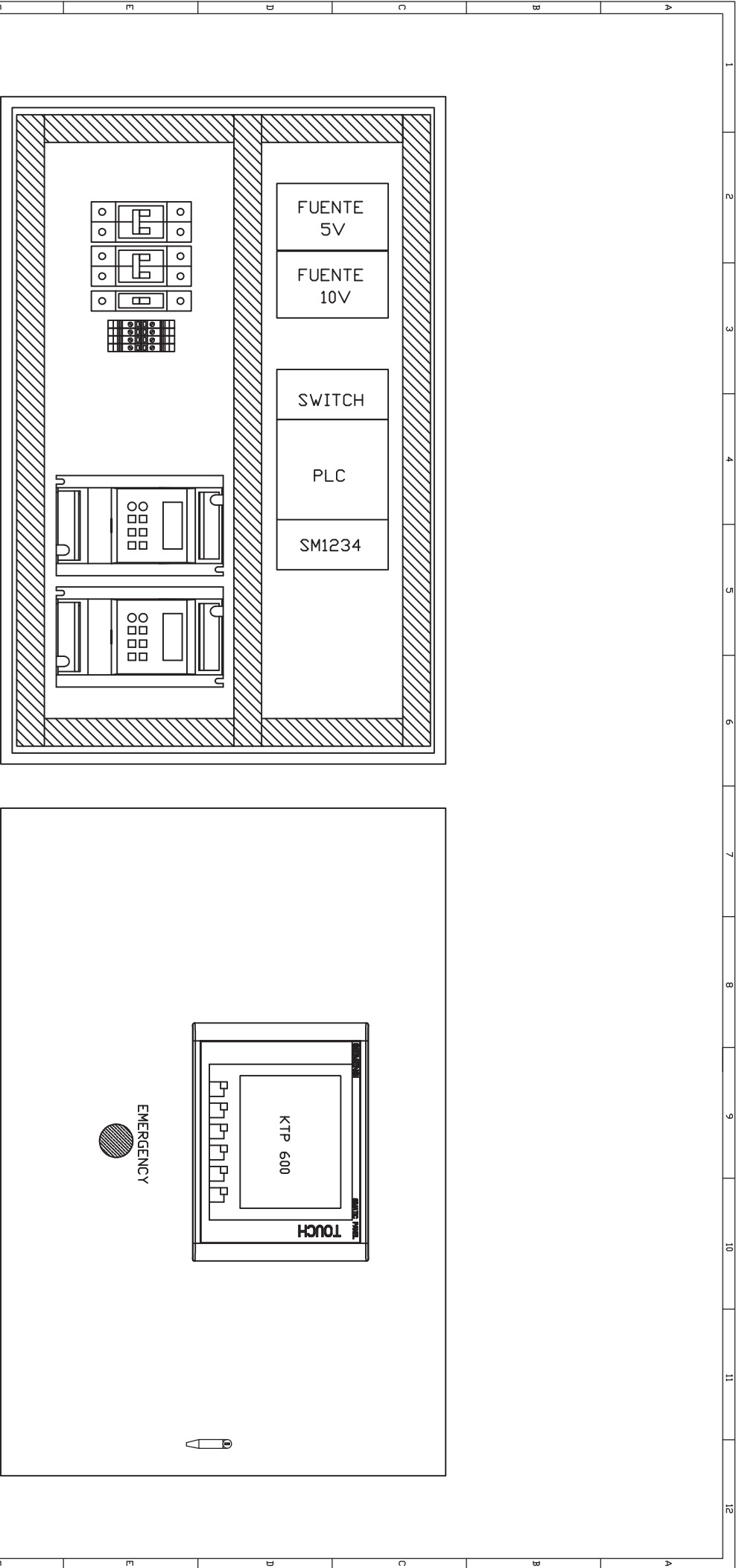


NOTAS GENERALES		BIBLIOTECA DE REFERENCIA		REVISIONES		INGENIERIA/CONTROLADO		FIRMA		FECHA		CLIENTE	
												DESCRIPCION Diagrama de control	
												DIBUJO No FRA_053_03	
												Hojas 3 DE 4	
												REV	

NOTAS		DESCRIPCION		DESCRIPCION		DESCRIPCION		DESCRIPCION		DESCRIPCION		DESCRIPCION	



TIEMPO AA  
 ESCALA S/E  
 PROYECTO  
 DIBUJO No FRA\_053\_03  
 Hojas 3 DE 4  
 REV



VISTA INTERIOR

VISTA EXTERIOR

NOTAS GENERALES		BIBLIOTECA DE REFERENCIA		REVISIONES		INGENIERIA/GESTION ASISTO		CLIENTE	
NUMERO	DESCRIPCION	REV	ENTIDAD PARA REVISION INTERNA	FECHA ELABORO	FECHA REVISO	ELABORADO POR	REVISADO POR	PROYECTO	DESCRIPCION
1		A		27/07/21		ING. DE DISEÑO	GERENTE TECNICO	Diagrama de montaje	
2							APROBACION DEL CLIENTE		
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									



TAMBO AA  
ESCALA: S/E

DIBUJADO POR  
FRA\_053\_04

HABIA 4 DE 4  
REV

## **ANEXO IV**

### **DIAGRAMA DE FLUJO**

# DIAGRAMA DE FLUJO

## PROGRAMA DE CONTROL PARA TANQUES MEDIANTE CONTROL PID Y DIFUSO

