

DISEÑO DE PROTOTIPO PARA ANÁLISIS Y CONTROL DEL NIVEL DE ACIDEZ EN
LOS EFLUENTES MINEROS LÍQUIDOS

AUTOR
HAROLD ENRIQUE RODRÍGUEZ TRUJILLO

Monografía

DIRECTOR
Ing. JUAN MAURICIO SALAMANCA, PhD

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO
2016



MACROPROCESO: DOCENCIA
 PROCESO ADMISIONES Y CONTROL DE REGISTRO ACADÉMICO
 PROCEDIMIENTO: PROCEDIMIENTO PARA GRADOS
 ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO - PROGRAMAS DE PREGRADO PRESENCIAL



Código: D-AR-P03-F05 Versión: 01 Página 1 de 1

FACULTAD: SECCIONAL SOGAMOSO
 PROGRAMA: INGENIERIA ELECTRONICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO No. 4

En la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, el día 14 del mes de OCTUBRE del año 2016 a las 16:30 horas, previa autorización del Comité Curricular y de acuerdo a la reglamentación vigente de trabajos de grado, se reunieron los Jurados Calificadores para evaluar la sustentación pública y dar evaluación final del trabajo presentado como modalidad de trabajo de grado.

TITULO: "DISEÑO DE PROTOTIPO PARA ANALISIS Y CONTROL DEL NIVEL DE ACIDEZ EN LOS EFLUENTES MINEROS LIQUIDOS".

NOMBRE DEL AUTOR: HAROLD ENRIQUE RODRIGUEZ TRUJILLO
 NÚMERO DE CÉDULA: 1057590038
 CÓDIGO: 200910117

NOMBRE JURADO 1: LUIS ARIEL MESA MESA
 NOMBRE JURADO 2: FABIAN ROLANDO JIMENEZ LOPEZ

MODALIDAD: MONOGRAFIA

TRABAJOS INVESTIGATIVOS	PRÁCTICAS POR EXTENSIÓN
TRABAJO MONOGRÁFICO <input checked="" type="checkbox"/>	PRÁCTICA CON PROYECCIÓN EMPRESARIAL _____
PARTICIPACIÓN ACTIVA EN UN GRUPO DE _____	PRÁCTICA CON PROYECCIÓN SOCIAL _____
PRESENTACIÓN Y DESARROLLO DE UN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN _____	PASANTÍA _____

OBTENIENDO LOS SIGUIENTES RESULTADOS:

FACTORES GENERALES	JURADO 1			JURADO 2			
	ALFABICACIÓN	VALOR %	CALIFICACIÓN PONDERADA	FACTORES GENERALES	VALOR %	CALIFICACIÓN PONDERADA	
Evaluación informe final escrito	4.5	60%	2.7	Evaluación informe final escrito	4.5	60%	2.7
Evaluación sustentación pública	4.5	40%	1.8	Evaluación sustentación pública	4.5	40%	1.8
TOTAL		100%		TOTAL		100%	

CALIFICACIÓN DEFINITIVA: Número: 4.5 Letras: CUATRO PUNTO CINCO

De acuerdo con el artículo 27 de la Resolución del Consejo Académico No. 16 del 17 de Marzo de 2009, la escala de evaluación cualitativa del Trabajo de Grado es la siguiente:

LAUREADO: Calificación (5.0)		Para constancia se firma:
MERITORIO: Calificación (4.5 - 4.9)	<input checked="" type="checkbox"/>	JURADO 1: LUIS ARIEL MESA MESA
SOBRESALIENTE: Calificación (4.0 - 4.4)		JURADO 2: FABIAN ROLANDO JIMENEZ LOPEZ
SATISFACTORIO: Calificación (3.5 - 3.9)		DIRECTOR DE TRABAJO: JUAN MAURICIO SALAMANCA
SUFICIENTE: Calificación (3.0 - 3.4)		PRESIDENTE COMITÉ CURRICULAR: SANDY ENRIQUE VELLA CELY
INSUFICIENTE: Calificación menor a 3.0		AUTOR HAROLD ENRIQUE RODRIGUEZ TRUJILLO



Dedicatoria

iv

A Dios, fortaleza y refugio en momentos de debilidad.

A mis padres y hermanas, por brindarme el apoyo durante todo el transcurso de mi carrera profesional.

A Laura por acompañarme en este logro tan importante en mi vida, además de brindarme apoyo en los momentos difíciles de mi carrera.

A todos mis amigos y familiares que de una u otra forma colaboraron con el desarrollo de este proyecto.

Agradecimientos

v

Ingeniero Juan Mauricio Salamanca, por ser el director de este proyecto y colaborarme en lo necesario para llevar a cabo su ejecución.

Ingeniera Liliana Fernández, por ser de gran ayuda en las correcciones del libro y en el diseño de las diapositivas para la presentación de la sustentación

Ingeniero Javier Báez, por ser de apoyo en la forma de cómo realizar la sustentación de mi trabajo de grado.

Ingenieros Luis Ariel Mesa y Fabián Jiménez por permitirme realizar las últimas correcciones del libro antes de realizar la sustentación.

En esta monografía se presenta el modelado el diseño y construcción, de un prototipo para el análisis y control del nivel de acidez en los efluentes mineros líquidos, con el fin de llevar las aguas que se generan en estos afluentes a un estado neutro es decir a un nivel de pH igual a 7. De esta forma se busca un tratamiento efectivo de estos líquidos que afectan el medio ambiente, cuando son vertidos hacia las fuentes hídricas sanas, y deterioran los instrumentos que tienen contacto con aguas ácidas. Para lograr el objetivo se probaron varias estrategias de control con el fin de comprobar cuál de ellas tiene un mejor desempeño en el prototipo.

Este estudio tiene en cuenta el planteamiento del problema, antecedentes, objetivos, dinámica del sistema, diseño del controlador, y construcción del prototipo. Para ello se plantean las especificaciones siguientes: medidas para la elaboración y el adecuado funcionamiento del prototipo. En la parte electrónica se consideran: sensores, actuadores, tarjetas de procesamiento entre otros.

Se diseña una estructura tipo planta piloto que consta de cuatro tanques con varios propósitos como el almacenamiento de las aguas ácidas a tratar, la neutralización de las aguas ácidas y el almacenamiento del agente neutralizante en este caso soda cáustica (NaOH) con una concentración de 1 Normal (1N).

Como estrategias de control se diseñaron controladores PID, controladores basados en lógica difusa, métodos algebraicos y por modos deslizantes. Para el diseño de estos controladores se tiene en cuenta la dinámica del sistema en los cambios de pH por parte de las aguas ácidas con respecto a la cantidad de soda caustica (NaOH) que se adiciona. La verificación de los resultados se hace a través del software Matlab[®]-Simulink[®], para poder realizar una comparación de la respuesta del prototipo con respecto al desempeño de los controladores implementados.

Tabla de Contenido

vii

Capítulo 1.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 ANTECEDENTES.....	3
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.5 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.6 OBJETIVOS.....	4
1.6.1 Objetivo General.....	4
1.6.2 Objetivos Específicos.....	4
Capítulo 2 MINA DIDÁCTICA CENTRO NACIONAL MINERO MORCÁ.....	5
2.1 CENTRO NACIONAL MINERO (CNM).....	5
2.2 CARACTERÍSTICAS MINA DIDÁCTICA.....	5
2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS.....	6
2.4 IMPACTOS AMBIENTALES.....	7
Capítulo 3 MARCO TEÓRICO.....	8
3.1 POTENCIAL DE HIDROGENO (PH).....	8
3.2 AGUAS ÁCIDAS.....	9
3.3 ADITIVOS BASE.....	9
3.4 CONTROLADOR PID.....	10
3.5 CONTROLADOR POR MÉTODO ALGEBRAICO.....	13
3.6 CONTROL MEDIANTE LÓGICA DIFUSA.....	18
3.6.1 Conjuntos.....	18
3.6.2 Funciones de Pertenencia.....	19
3.6.3 Operaciones entre Subconjuntos.....	20
3.6.4 Fusificación.....	20
3.6.5 Defusificación.....	21
3.7 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES.....	21
Capítulo 4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.....	24
4.1 ESTRUCTURA FISICA DEL PROTOTIPO.....	24
4.1.1 Interconexión de Tanques.....	24
4.2 DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	24
4.3 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS.....	25
4.3.1 Sensores.....	25
4.3.1.1 Sensor de pH.....	26
4.3.1.2 Sensor de Flujo.....	28
4.3.1.3 Sensor de Nivel.....	29
4.3.2 Actuadores.....	30
4.3.2.1 Electroválvula.....	30
4.3.2 Bomba Peristáltica.....	31
4.3.2.3 Motorreductor AC.....	32
4.3.2.4 Bomba Sumergible.....	33
4.3.3 Tarjeta de Procesamiento.....	33
4.3.3.1 Arduino UNO.....	34
4.3.3.2 Arduino MEGA 2560.....	34

4.3.4 Modulo Bomba Peristáltica.....	35
4.3.5 Conexión Acople de Fuentes.	36
4.3.6 Fuente de Alimentación.	36
4.3.6 Dispositivos Seleccionados.....	37
4.4 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	38
4.4.1 Proceso de Llenado Tanque Reactor	38
4.4.2 Proceso de Neutralización Aguas Ácidas	39
4.4.3 Proceso de Drenaje Aguas Ácidas	40
Capítulo 5 MODELADO DEL SISTEMA	42
5.1 MODELO DEL SISTEMA	42
5.2 VALIDACION DEL MODELO	43
Capítulo 6 DISEÑO DE CONTROLADORES	45
6.1 CONTROLADOR	45
6.2 CONTROLADOR PI.....	45
6.2.1 Implementación Controlador PI.....	46
6.2.2 Resultados Controlador PI.	47
6.3 CONTROLADOR POR MÉTODO ALGEBRAICO	49
6.3.1 Implementación Controlador Algebraico.	50
6.3.2 Resultados Controlador Algebraico.....	50
6.4 CONTROL MEDIANTE LÓGICA DIFUSA	52
6.4.1 Implementación Controlador Lógica Difusa.	54
6.4.2 Resultados Controlador Lógica Difusa.....	55
6.5 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES.....	57
6.5.1 Implementación Controlador Modos Deslizantes.....	57
6.5.2 Resultados Controlador Modos Deslizantes	58
Capítulo 7 RESULTADOS.....	60
7.1 ANALISIS DE RESULTADOS.....	60
7.2 CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS.....	64
ANEXOS	70
APENDICE.....	78

Tabla 1.1	Antecedentes drenajes ácidos de mina.....	3
Tabla 3.1	Parámetros de controladores PID.	11
Tabla 3.2	Criterios de mínima integral del error.....	12
Tabla 3.3	Operaciones entre subconjuntos.	20
Tabla 4.1	Descripción elementos del diagrama del prototipo.....	25
Tabla 4.2	Comparación sensores de pH.....	26
Tabla 4.3	Rango de voltaje sensor de pH	27
Tabla 4.4	Especificaciones sensor de pH.....	27
Tabla 4.5	Especificaciones circuito interfaz.	27
Tabla 4.6	Comparación sensores de flujo	28
Tabla 4.7	Especificaciones sensor de flujo.....	29
Tabla 4.8	Especificaciones electroválvula.	30
Tabla 4.9	Comparación bombas peristálticas	31
Tabla 4.10	Especificaciones bomba peristáltica.	32
Tabla 4.11	Especificaciones motorreductor AC.....	32
Tabla 4.12	Comparación bombas sumergibles	33
Tabla 4.13	Especificaciones bomba sumergible.....	33
Tabla 4.14	Características Arduino UNO.....	34
Tabla 4.15	Características Arduino MEGA 2560.....	35
Tabla 4.16	Especificaciones módulo L298N.....	36
Tabla 4.17	Especificaciones fuente regulada BK-1502TA.....	36
Tabla 4.18	Descripción de dispositivos seleccionados	37
Tabla 4.19	Estados lógicos de los procesos para el funcionamiento del prototipo.	38
Tabla 6.1	Resultados de los criterios implementados en el controlador PI.....	38
Tabla 6.2	Reglas controlador lógica difusa.....	53
Tabla 7.1	Comparación controladores.	61

Lista de figuras

X

Figura 2.1a Plano de labores mina didáctica (SENA)	5
Figura 2.1b Entrada túnel 1 mina didáctica (SENA)	6
Figura 2.1c Entrada túnel 2 mina didáctica (SENA)	6
Figura 2.2a Planta piloto de floculación	7
Figura 2.2b Vertimiento de aguas tratadas	7
Figura 2.2c Tanque almacenamiento de aguas tratadas	7
Figura 3.1 Curva de titulación ácido base	8
Figura 3.2 Diagrama de bloques controlador PID	10
Figura 3.3 Curva de respuesta en lazo abierto	10
Figura 3.4 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado	13
Figura 3.5 Esquema controlador algebraico	13
Figura 3.6 Esquema controlador mediante lógica difusa	18
Figura 3.7 Ejemplo de subconjuntos para el conjunto velocidad	19
Figura 3.8a Forma triangular	19
Figura 3.8b Forma trapezoidal	19
Figura 3.8c Forma S	19
Figura 3.8d Forma singleton	19
Figura 3.9a Operación AND	20
Figura 3.9b Operación OR	20
Figura 3.9c Operación NOT	20
Figura 3.10 Lazo de control difuso	21
Figura 3.11a Conmutaciones a frecuencia infinita	22
Figura 3.11b Conmutaciones a frecuencia finita	22
Figura 4.1a Diagrama de flujo diseño del prototipo	24
Figura 4.1b Diagrama del prototipo implementado	25
Figura 4.1c Prototipo implementado	25
Figura 4.2a Rango de voltaje sensor de pH	27
Figura 4.2b Rango de voltaje circuito interfaz	27
Figura 4.3a Sensor de pH SKU: SEN0161	28
Figura 4.3b Circuito interfaz pH meter V1.0	28
Figura 4.4 Sensor de flujo YF-S201	29
Figura 4.5 Sensor de nivel ON/OFF	29
Figura 4.6 Partes electroválvula	30
Figura 4.7 Electroválvula 8320G184	30
Figura 4.8a Fases de funcionamiento	31
Figura 4.8b Bomba peristáltica SKU: B00KJ5X1NY	31
Figura 4.9 Motorreductor SKU: H31YDAB0	32
Figura 4.10 Bomba sumergible SKU: WP-300	33
Figura 4.11 Tarjeta Arduino UNO	34
Figura 4.12 Tarjeta Arduino MEGA 2560	35
Figura 4.13 Módulo L298N	36
Figura 4.14a Relé 5Vdc	36
Figura 4.14b Conexión salida digital tarjeta Arduino con relé	36
Figura 4.15 Fuente regulada BK-1502TA	36

Figura 4.16 Diagrama del prototipo implementado	37
Figura 4.17a Diagrama proceso de llenado tanque reactor	39
Figura 4.17b Conexión de pines I/O del proceso de llenado tanque reactor	39
Figura 4.18a Diagrama proceso de neutralización aguas ácidas.....	39
Figura 4.18b Conexión de pines I/O del proceso de neutralización de aguas ácidas.	40
Figura 4.19a Diagrama proceso de drenaje aguas tratadas	40
Figura 4.19b Conexión de pines I/O del proceso drenaje aguas tratadas.	40
Figura 4.20a Diagrama de flujo llenado tanque reactor.....	41
Figura 4.20b Diagrama de flujo neutralización aguas ácidas	41
Figura 4.20c Diagrama de flujo drenaje aguas tratadas.....	41
Figura 5.1 Esquema del sistema de concentración.	42
Figura 5.2 Esquema implementado en Matlab-Simulink para curva de respuesta	43
Figura 5.3 Curva de respuesta del sistema.....	44
Figura 6.1a Controlador PI implementado en Matlab-Simulink	46
Figura 6.1b Configuración controlador PI en Matlab-Simulink.....	46
Figura 6.2 Comparación criterios implementados en el controlador PI.	47
Figura 6.3 Señal de control aplicada al sistema controlador PI.....	48
Figura 6.4 Respuesta del sistema al controlador PI.....	48
Figura 6.5 Error del sistema al controlador PI.....	49
Figura 6.6 Esquema controlador algebraico implementado en Matlab-Simulink	50
Figura 6.7 Señal de control aplicada al sistema controlador algebraico.....	51
Figura 6.8 Respuesta del sistema al controlador algebraico	51
Figura 6.9 Error del sistema al controlador algebraico.....	52
Figura 6.10 Diagrama de bloques controlador mediante lógica difusa	52
Figura 6.11 Subconjuntos pertenecientes al conjunto error.....	53
Figura 6.12 Subconjuntos pertenecientes al conjunto peristáltica	54
Figura 6.13 Operaciones de control para el prototipo.....	54
Figura 6.14 Gráfica del controlador de lógica difusa (Peristáltica Vs Error)	54
Figura 6.15a Esquema controlador lógica difusa implementado en Matlab-Simulink....	55
Figura 6.15b Configuración controlador de lógica difusa en Matlab-Simulink	55
Figura 6.16 Señal de control aplicada al sistema mediante lógica difusa.....	55
Figura 6.17 Respuesta del sistema al controlador de lógica difusa	56
Figura 6.18 Error del sistema al controlador de lógica difusa	56
Figura 6.19a Esquema controlador de modos deslizantes en Matlab-Simulink	57
Figura 6.19b Configuración controlador de modos deslizantes en Matlab-Simulink	57
Figura 6.20 Señal de control aplicada al sistema modos deslizantes.....	58
Figura 6.21 Respuesta del sistema al controlador por modos deslizantes	58
Figura 6.22 Error del sistema al controlador por modos deslizantes.....	59
Figura 7.1 Comparación de los controladores implementados en el prototipo.....	60

Capítulo 1

1.1 INTRODUCCIÓN

Una de las fuentes de energía utilizadas en el proceso de generación eléctrica es el carbón. Sin embargo la explotación de carbón produce contaminación en todas las etapas de producción, ya sea en su extracción, transporte, almacenamiento, preparación, transformación y especialmente durante su consumo. Utilizar agua en la minería del carbón es muy importante porque se necesitan importantes cantidades en la separación del mineral de sus alrededores ya sea en medios subterráneos o superficiales, incluso es necesaria durante el procesamiento de los minerales la cual consiste en separar el mineral útil, en este caso el carbón de otros materiales sin valor [1].

Existen minas de carbón en las cuales existen aguas subterráneas, estas aguas son usadas en el proceso de perforación hidráulica, el cual consiste en inyectar agua a alta presión hacia el frente de la mina, la energía de la corriente de agua rompe el mineral de la pared de la mina y lo arrastra a un sistema de recolección. El agua usada para el proceso anterior debe ser extraída de la mina y con frecuencia debe ser bombeada a distancias apreciables, desde el frente de la mina hasta la superficie. En la industria del carbón las reacciones con las formas de piritas de hierro, que están íntimamente mezcladas con el carbón, producen agua ácida, y el tratamiento de los efluentes mineros líquidos es un serio problema para la industria [2].

De acuerdo con [3] uno de estos problemas es la corrosión en los equipos industriales que tienen contacto con los drenajes ácidos. Un problema mayor que ocurre en las aguas contaminadas es que sus niveles de oxígeno se alteran considerablemente y sus efluentes mineros líquidos en la mayoría de los casos son arrojados hacia ríos o lagunas cercanas al lugar donde ocurra la explotación de los minerales, esto conlleva a la contaminación de aguas saludables, lo cual altera los niveles de oxígeno y por consiguiente, no solo afecta la química y la biología sino también a la ecología de la corriente de agua. El efecto se nota en la disminución de especies presentes como truchas o peces, debido a que los peces no tienen lugares donde desovar, se generan cambios en la biota y en las plantas y por último, el color del agua se torna gris oscuro. En algunos casos el agua se torna de color negro y el olor cambia dramáticamente hasta hacerse fétido. Muchos de estos cambios son irreversibles.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Aunque los más frecuentes ejemplos de contaminación por drenaje ácido de minas proceden de Estados Unidos y Canadá, este problema afecta igualmente numerosos estados de Sudamérica, África, Europa, Australia. En estos países se desarrolla una alta actividad minera en yacimientos con presencia de sulfuros y en la minería que contiene pirita de oro, plata, cobre, zinc, uranio y carbón.

En Estados Unidos, el drenaje ácido de minas constituye el problema número uno de contaminación. Este país, se ve afectado, por este tipo de contaminación, un total de más de 17.000 Km. de ríos repartidos, por casi 20 estados de la Unión [4]. En Colombia se ha presentado y detectado drenaje ácido de minas, principalmente en las explotaciones de carbón y oro, en los yacimientos que son explotados especialmente en el departamento de la Guajira. Las características de los efluentes del drenaje ácido de minas son similares a los generados en las minas a nivel mundial, ya sean subterráneas o a cielo abierto [5].

El drenaje de las aguas ácidas genera varios impactos negativos en el ámbito ambiental, industrial y cívico. Los drenajes ácidos de mina afectan las fuentes hídricas cercanas a la zona de explotación, esto genera conflictos con las comunidades aledañas por la contaminación de las fuentes hídricas, enfermedades en sus animales y sequía en sus cultivos. Además de la destrucción y alteración de los ecosistemas que tienen contacto con estas aguas. En algunas zonas el problema es mayor después del cierre de las operaciones mineras debido a la remoción del equipo de bombeo que drena las aguas ácidas presentes. En la industria minera del carbón los drenajes ácidos de mina conllevan un problema serio debido a la corrosión en los equipos que tienen contacto con estos líquidos especialmente el sistema de bombeo que drena las aguas ácidas desde el frente de la mina hasta la superficie.

Una de las mejores defensas contra el drenaje ácido de minas es evitar que el que la pirita entre en contacto con el aire y el agua, porque una vez que la reacción comienza es difícil detenerla y continuará por varias décadas. El control de la generación de ácido se puede realizar por varios métodos, uno de ellos es el de 'Aditivos Base' [6] el cual consiste en neutralizar el nivel de acidez del efluente.

Este proyecto busca tratar nivel de acidez tomando como caso de estudio los efluentes mineros líquidos provenientes de la mina de carbón, situada en Morcá (vereda de Sogamoso) la cual pertenece al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA); estas aguas ácidas contienen un nivel de pH de 3.5, en algunos casos inferior a este valor.

1.3 ANTECEDENTES

En la Tabla 1.1 se pueden apreciar los antecedentes más relevantes acerca de los drenajes ácidos de mina.

Tabla 1.1 Antecedentes drenajes ácidos de mina.

<i>Año</i>	<i>Hito</i>
1970	Se crea la EPA encargada de proteger la salud humana y del medio ambiente [7].
1977	Creación del programa AML (Abandoned Mines Lands, Tierras de Minas Abandonadas) con el fin de atajar la contaminación provocada por las minas inactivas desde hace más de un siglo [8].
1987	Se adquiere un método estadístico para la determinación de asientos con suelos contaminados y el monitoreo biológico [9].
1992	Los drenajes ácidos de mina se tratan por sistemas estáticos, tratando estas aguas en la misma mina usando abono y piedra caliza [10].
1994	Se realiza un ensayo estático por parte de la EPA (Environmental Protection Agency, Agencia de Protección Ambiental) el cual predice la calidad de los drenajes mediante la comparación entre la capacidad de neutralización y el potencial de generación ácida [11].
1997	Se establece una necesidad de buscar soluciones de fácil aplicación y bajo costo para reducir la contaminación de los recursos hídricos ya que la contaminación por parte de las aguas ácidas puede perdurar por cientos de años [12].
1999	Se encuentra que el principal responsable de la formación de aguas ácidas es la oxidación de la pirita [13].
2006	En España empieza un proyecto con el fin de recuperar una zona afectada por los drenajes ácidos de mina por parte del Ingeniero de Minas Dr. Osvaldo Aduvire [14].
2007	Se obtienen avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas utilizando una planta piloto de flotación por aire disuelto de alta tasa [15].
2010	En Perú se implementa un nuevo método para neutralizar las aguas ácidas procedentes de una mina de cobre por medio de la dolomita [16].
2010	Se implementa una planta piloto para tratar los drenajes ácidos de mina en la vereda de Reginaldo, Monguí – Boyacá [17].
2012	Se mejora el tratamiento de los drenajes ácidos de mina en el distrito minero auroargentífero en California-Santander [18].
2013	Se implementa un tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por las aguas ácidas en el municipio de Marmato – Caldas [19].
2015	En Bolivia se presenta una propuesta para neutralizar las aguas ácidas de mina procedentes de la mina Milluni mediante drenes anóxicos calizos [20].

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los problemas ambientales más apremiantes en la industria minera es la generación de drenajes ácidos de minas con contenidos elevados de sulfatos, metales pesados y pH por debajo de 5, los cuales causan grandes problemas ambientales debido a su alto potencial de contaminación en los recursos hídricos superficiales o subterráneos cercanos a las zonas de explotación, además, esas aguas pueden llegar a dañar la estructura y la cimentación de construcciones.

1.5 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo tratar el nivel de pH en los efluentes mineros líquidos, los cuales contienen un alto potencial contaminante?

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo que permita analizar y controlar el nivel de pH en los efluentes mineros líquidos provenientes de la mina didáctica de carbón situada en Morcá la cual pertenece al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

1.6.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la generación de drenajes ácidos de minas por parte de una mina de carbón situada en Morcá la cual es explotada por el SENA.
- Realizar un análisis experimental con los efluentes mineros líquidos provenientes de la mina de carbón la cual pertenece al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) situada en Morcá.
- Diseñar e implementar un prototipo para el análisis y control de los niveles de acidez en los efluentes mineros mediante el método de ‘Aditivos Base’.

Capítulo 2

MINA DIDÁCTICA CENTRO NACIONAL MINERO (MORCÁ)

2.1 CENTRO NACIONAL MINERO (CNM)

El Centro Nacional Minero (CNM) fue creado mediante el decreto 126 del 23 de noviembre de 1970 emanado del Consejo Directivo Nacional del SENA. Inició labores el 23 de febrero de 1971 en respuesta a la necesidad de capacitación en el ramo minero, especialmente en Antioquia, Valle, Boyacá y Cundinamarca. En sus inicios tenía sus instalaciones en el sitio denominado Matayeguas, a 9 Km del casco urbano de Sogamoso. Actualmente cuenta con instalaciones propias e infraestructura adecuada en la Mina Didáctica ubicada en Morcá (vereda de Sogamoso), a 7 Km del casco urbano de Sogamoso. Inició su capacitación con el programa de Técnico en Minería, y manteniéndose al nivel de las necesidades laborales en el sector minero amplió sus programas para satisfacer los proyectos de educación en Colombia [21].

2.2 CARACTERÍSTICAS MINA DIDÁCTICA

Según [22] y el plano de labores de la mina didáctica (ver Figura 2.1a) está conformada por tres túneles principales. El túnel No 1 como se ilustra en la Figura 2.1b se encuentra a una altura de 2695 m.s.n.m, tiene una longitud de 210m, con una inclinación de 9° , posee un sostenimiento inicial de 10 m en arcos de acero y concreto, continua con diferentes tipos de sostenimiento como arcos de acero de tres y cuatro secciones.

El túnel No 2 (ver Figura 2.1c) se halla a una altura de 2694 m.s.n.m, tiene una inclinación de 9° , posee un sostenimiento inicial de 10m en arcos de acero y concreto, continua con diferentes tipos de sostenimiento como arcos de acero de tres y cuatro secciones. El túnel No 3 se localiza a una altura de 2747 m.s.n.m, tiene una inclinación de 35° , tiene un sostenimiento inicial de 10 m en arcos de acero y concreto, continua con diferentes tipos de sostenimiento como arcos de acero de tres y cuatro secciones.

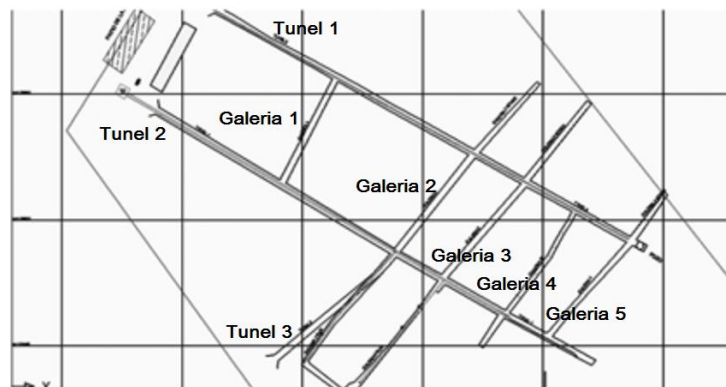


Figura 2.1a Plano de labores mina didáctica (SENA).



Figura 2.1b Entrada túnel 1 mina didáctica (SENA). Figura 2.1c Entrada túnel 2 mina didáctica (SENA).

La mina didáctica posee cinco galerías llamadas galería 1, galería 2 sur, galería 2 norte, galería 3 sur, galería 3 norte, galería 33 y galería 4 norte; todas las galerías tienen longitudes que varían entre 45 y 50 m; su sostenimiento es en puerta alemana. Además tiene un tambor el cual une la galería 3 sur con la galería 2 norte, posee una longitud de 23 m, su sostenimiento es en cuadros de madera. Dentro de la mina se encuentran diferentes equipos como una banda transportadora de 156m de largo y 0.6m de ancho, un monorriel que alimenta la banda, tres ventiladores uno principal y dos auxiliares, compresores, un pulmón, una tolva metálica y un malacate eléctrico.

Para el drenaje de las aguas ácidas del interior de la mina didáctica, se cuenta con un pozo de bombeo ubicado al final del túnel 2, este pozo tiene un área de 50m². En esta parte existen 2 electrobombas, una de 15hp y otra de 18hp.

2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS

De acuerdo con [23], el tratamiento de las aguas ácidas se lleva a cabo mediante una planta piloto de floculación (ver Figura 2.2a), la estructura está conformada por tres flautas de caliza, una flauta de coque y un cajón mezclador el cual por medio de un motor agrega hidróxido de sodio y sulfato de aluminio; este cajón mezclador permite que se sedimenten los lodos y se neutralice el pH; por medio de una tubería en la parte inferior se evacuan los lodos y un tubo localizado en la parte anterior es usado para drenar las aguas tratadas hacia la quebrada Las Torres como se muestra en la Figura 2.2b.

Teniendo como base los estudios de aguas realizados por el Centro Nacional Minero del SENA, el contenido de hierro de los efluentes mineros es de 123 ppm teniendo como permisible 0.3 ppm (Según lo establecido por la Resolución No 2115 de 2007, artículo 7, Cuadro No 4), la coloración del agua antes y después de ser tratada posee una coloración naranja (ver Figura 2.2c); el nivel de pH del agua es de 3.5, según la resolución debe ser entre 6.5 y 9, un valor de 7 es el valor ideal en el nivel de pH. Se debe tener en cuenta que la resolución No 2115 de 2007 señala las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.



Figura 2.2a Planta piloto de floculación.



Figura 2.2b Vertimiento de aguas tratadas.



Figura 2.2c Tanque almacenamiento de aguas tratadas.

2.4 IMPACTOS AMBIENTALES

Teniendo en cuenta [24], la producción minera genera varios impactos ambientales con su actividad y en algunos casos con consecuencias irreversibles para el medio ambiente.

La generación de residuos sólidos disminuye la biodiversidad, altera el paisaje y el contraste paisajístico en las zonas cercanas a la explotación minera. Para solucionar este impacto se necesita implementar la recolección, clasificación y reciclaje de los residuos sólidos por medio de canecas y la instalación de puntos verdes.

El vertimiento de aguas ácidas en las fuentes hídricas sanas disminuye considerablemente la biodiversidad presente (plantas, animales) y genera erosión. La construcción de una planta de tratamiento de aguas óptimo y eficiente, la reforestación alrededor del área de tratamiento, el control y monitoreo de la calidad del agua son las medidas necesarias para corregir este problema ambiental.

La generación de material particulado genera una acidificación de los suelos y fuentes hídricas, para remediar este problema es necesario instalar barreras naturales o artificiales rompe vientos, humectar por medio de aspersores, y el mantenimiento continuo de las vías.

Capítulo 3 MARCO TEÓRICO

3.1 POTENCIAL DE HIDROGENO (pH)

El potencial de hidrogeno o pH es un indicador de la acidez de una sustancia y está determinado por el número de iones libres de Hidrógeno (H^+). El pH del agua puede variar entre 0 y 14, cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica y si está por debajo de 7, es una sustancia ácida [25].

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes en la química del agua, puesto que se tiene en cuenta para toda clase de usos (consumo humano y doméstico, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial y transporte) y tratamiento de aguas residuales (neutralización y ablandamiento, precipitación, coagulación, desinfección y control de corrosión).

El valor de pH está muy relacionado con la alcalinidad y la acidez de las aguas ya que es el resultado de la interacción entre ellos. La presencia de niveles de pH bajos en agua utilizada para labores rutinarias en la minería ocasiona grandes inconvenientes; como la contaminación de la fauna, flora y fuentes hídricas sanas en los lugares aledaños a la explotación del mineral. Además genera deterioro por corrosión en los equipos y elementos utilizados en la explotación del mineral [26].

Según [27] la ecuación del pH está dada por $pH = -\log[H^+]$, a partir de ella se puede encontrar la curva de titulación entre un ácido y una base como se puede observar en la Figura 3.1.

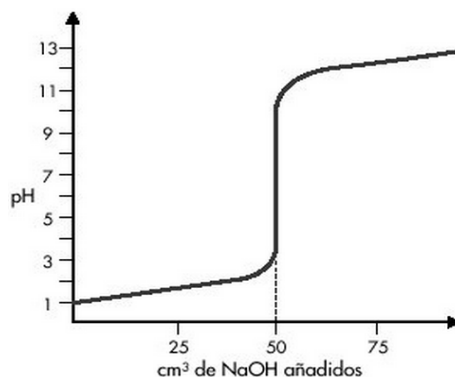


Figura 3.1 Curva de titulación ácido base.

Fuente: Química Analítica, Curvas de titulación Acido - Base

3.2 AGUAS ÁCIDAS

Un agua es ácida cuando su pH es menor a siete ($\text{pH} < 7$). No obstante, ello no exige que deje de ser potable o se torne nociva a no ser que alcance niveles bastante inferiores (por ejemplo, deja de ser potable en valores inferiores a seis ($\text{pH} < 5.5$). En la naturaleza, normalmente y sin intervención humana, es muy raro encontrar niveles por debajo de cuatro ($\text{pH} < 3.5$) o mayores a diez ($\text{pH} > 10.5$) en las aguas, existiendo una tendencia natural a su neutralización (por saturación, precipitación, dilución, ente otras) [28].

La solubilidad de rocas y minerales, se ve fuertemente afectada por el pH del medio, de forma que, un agua ácida, suele además de ser nociva por su pH, ir acompañada de numerosos metales en disolución, que aportan una importante toxicidad al efluente. Las aguas ácidas se pueden formar tanto en el interior como en la superficie, por oxidación de la pirita (FeS_2 u otros sulfuros) en presencia de humedad expuesta a las condiciones atmosféricas, pudiendo acceder al sistema hídrico subterráneo, contaminando acuíferos o pudiendo surgir como efluentes que se vierten en cursos de agua superficial.

Las aguas ácidas se generan en la explotación de yacimientos de carbón, sulfuros metálicos o de uranio, quedando expuestos a meteorización grandes volúmenes de materiales sulfurosos y representan la principal causa de contaminación de aguas derivadas de la minería.

3.3 ADITIVOS BASE

El método de los ‘Aditivos Base’ consiste en la adición de compuestos tales como hidróxido sódico, caliza, cal o carbonato sódico que neutralizan las aguas. Es el método más comúnmente utilizado para tratar estériles piríticos de carbón. La adición puede realizarse de diversas formas: carga del agua con aditivos base antes de que ésta entre en contacto con los sulfuros; colocación de materiales alcalinos en los puntos de recarga de los acuíferos, adición por medio de sondeos a las aguas retenidas en minas abandonadas o en escombreras, neutralización de aguas de escorrentía mediante la intervención en diques o canales en los que ésta se recoge (para más detalles ver [29]).

Este método es el que se utilizará en el presente proyecto, por lo que los capítulos subsiguientes harán referencia a la neutralización de aguas ácidas por medio de aditivos base, para este proyecto es la soda caustica (NaOH) con una concentración de 1N (1 Normal).

3.4 CONTROLADOR PID

Según [30] para poder sintonizar un controlador PID como se observa en la Figura 3.2, es conveniente tener en cuenta los parámetros de Ganancia (Banda Proporcional), Tiempo Integral y Tiempo Derivativo, con el fin de que el sistema responda de forma adecuada. Con el objetivo de sintonizar el controlador se debe obtener la información estática y dinámica del lazo. Existen dos métodos para ajustar los parámetros de los controladores PID: El método en lazo cerrado que consiste en obtener la información de las características del lazo a partir de una prueba en lazo cerrado, con un controlador de acción proporcional pura. Y el método en lazo abierto que consiste en adquirir las características estáticas y dinámicas del sistema (Planta) a partir de la respuesta a un escalón.

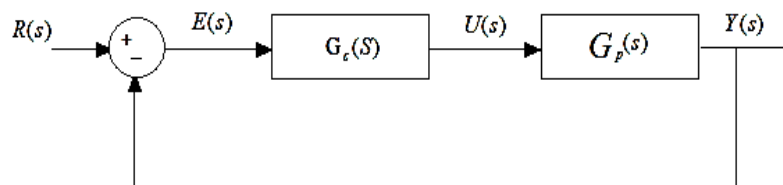


Figura 3.2 Diagrama de bloques controlador PID.

Uno de los métodos de sintonización más comunes en lazo abierto es el método de Ziegler y Nichols o curva de respuesta. Como se muestra en la Figura 3.3, este método consiste en aplicar un escalón en la señal de control y registrar los cambios en la variable medida o controlada. Otro método es el del punto de inflexión. En este método se adquieren las características de la planta a controlar; puede ser un sistema de primer o segundo orden, incluso pueden tener un tiempo muerto. También existe el método de lazo abierto de Cohen y Coon, en el cual se emplea la misma prueba que en el modelo de Ziegler y Nichols, teniendo en cuenta el grado de autorregulación de la planta.

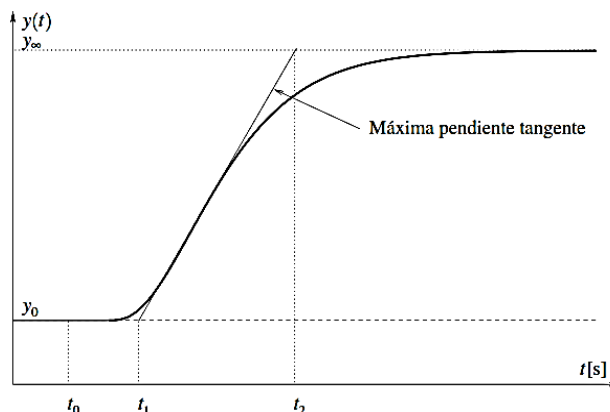


Figura 3.3 Curva de respuesta en lazo abierto.

Fuente: Control PID clásico, CAUT1 Clase 7

A partir de la curva de respuesta se obtiene la ecuación (3.1) con los siguientes parámetros.

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} ; \tau_0 = t_1 - t_0 ; \gamma_0 = t_2 - t_1 \quad (3.1)$$

Donde K_0 representa la ganancia proporcionada por el sistema dados por la relación entre la salida estabilizada del sistema y_∞ con respecto al escalón de entrada u_∞ , t_1 corresponde al tiempo muerto del sistema. Es decir el tiempo que tarda el sistema en responder. El parámetro t_2 es el tiempo de subida, es el tiempo es calculado al encontrar el 63.2% de la ganancia proporcionada por el sistema.

Con los parámetros anteriores se obtiene la función de transferencia (3.2) del sistema.

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-\tau_0 s}}{\gamma_0 s + 1} \quad (3.2)$$

Los parámetros del controlador PID propuesto por Ziegler y Nichols a partir de la curva de respuesta se calculan a partir de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros de controladores PID.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$\frac{0.9 \gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$3 \tau_0$	
PID	$\frac{1.2 \gamma_0}{K_0 \tau_0}$	$2 \tau_0$	$0.5 \tau_0$

Fuente: Control PID clásico, CAUT1 Clase 7

La ecuación (3.3) general del PID es la siguiente: (ver más [31])

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (3.3)$$

Donde la función $e(t)$ es el error entre la salida deseada o punto de ajuste y la salida actual del proceso. Como se observa en la expresión (3.3) el PID hace una ponderación del error de seguimiento, de la integral del error de seguimiento y de la derivada del error de seguimiento. Estas ponderaciones son las que lo hacen tan versátil en el control de procesos. La ponderación del error hace robusto al controlador frente a posibles ruidos, la ponderación de la integral del error reduce el error en estado estacionario a cero y la ponderación de la derivada del error hace que el error tienda a cero más rápidamente.

Existen varios criterios para minimizar el error, uno de ellos es la integral del cuadrado del error (ICE) representado por $\int_0^\infty e(t)^2 dt$, otro criterio es la integral del valor absoluto del error (IAE) definido por $\int_0^\infty |e(t)| dt$, un tercer criterio es la integral del valor absoluto del error ponderado en el tiempo (ITAE) determinado por $\int_0^\infty t|e(t)| dt$. En la Tabla 3.2 se encuentran las ecuaciones para hallar los parámetros de los controladores PID dependiendo del criterio a implementar.

Tabla 3.2 Criterios de mínima integral del error.

Controlador	P		PI				PID					
	$K_p = \frac{a}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^b$		$K_p = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_1}$		$\tau_i = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_2}$		$K_p = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_1}$		$\tau_i = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_2}$		$\tau_d = a_3 \tau \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{b_3}$	
Criterios	a	b	a ₁	b ₁	a ₂	b ₂	a ₁	b ₁	a ₂	b ₂	a ₃	b ₃
ICE	1.411	-0.917	1.305	-0.959	0.492	0.739	1.495	-0.945	1.101	0.771	0.560	1.006
IAE	0.902	-0.985	0.984	-0.986	0.608	0.707	1.435	-0.921	0.878	0.749	0.482	1.137
ITAE	0.490	-1084	0.859	-0.977	0.674	0.680	1.357	-0.947	0.842	0.738	0.381	0.995

La función $u(t)$ de la ecuación (3.3) es la señal de control calculada por el PID y que se aplicará al proceso (incluidos amplificadores, actuadores y planta). La función de transferencia del controlador está representada en (3.4) donde $K_d = K_p T_d$ y $K_i = K_p / T_i$.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_D s^2 + k_p s + k_I}{s} \quad (3.4)$$

La expresión dada por (3.4) es impropia debido a que el grado del polinomio del denominador es menor que el grado del polinomio del numerador. Esto se debe principalmente al término del derivador de la señal del error $k_D s$. Para salvar este problema se puede aproximar el término derivador por una función de transferencia de primer orden (3.5).

$$k_D s \cong \frac{k_D s}{1 + k_D s / N} \quad (3.5)$$

Esta función de transferencia aproxima la derivada a bajas frecuencias, pero la ganancia se limita por N a las altas frecuencias. N se debe seleccionar típicamente en el rango de tres a veinte. Con esto la función de transferencia del PID (pseudo-derivativo) es expresada por (3.6).

$$\frac{U(s)}{E(s)} \cong \frac{(1 + 1/N)k_D s^2 + (k_p + k_I k_D / N)s + k_I}{(k_D s / N + 1)s^2} \quad (3.6)$$

El diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado es ilustrado en la Figura 3.4.

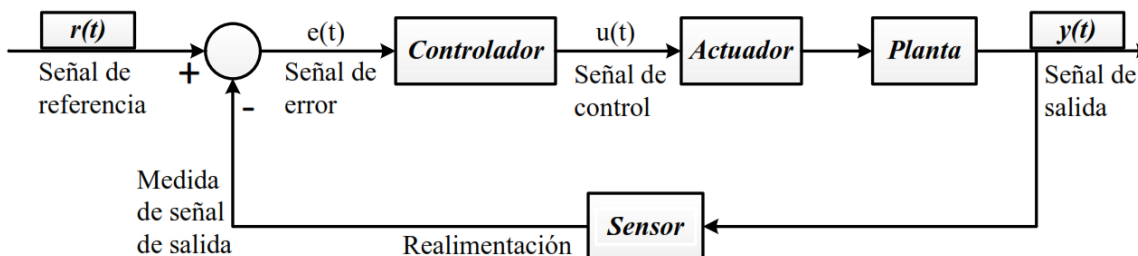


Figura 3.4 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.

3.5 CONTROL POR MÉTODO ALGEBRAICO

Los métodos algebraicos [32], constituyen un método sistemático de diseño de control, el cual se puede desarrollar de forma general, tanto para sistemas lineales de tiempo continuo, como para sistemas de tiempo discreto [33] [34] Las estrategias de control basadas en métodos algebraicos buscan hacer que una planta o proceso se comporte como un modelo de referencia deseado. En el modelo de referencia deseado se consignan normalmente las especificaciones deseadas de diseño, tales como tiempo de respuesta, máximo sobre pico, error en estado estacionario entre otras [35].

Asumiendo un modelo de sistema de primer orden con retardo dado por la ecuación $G_0(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau_p s + 1}$.

Se realiza el procedimiento respectivo para encontrar la señal de control característica del controlador algebraico. La representación del esquema para la implementación del controlador algebraico se muestra en la Figura 3.5.

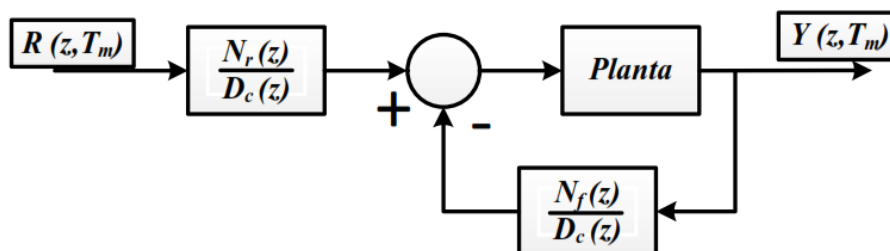


Figura 3.5 Esquema controlador algebraico.

Para el diseño digital del controlador por métodos algebraicos se debe discretizar el modelo con un periodo de muestreo T_m tal que $\theta = (d-1)T_m + \Delta\theta : 0 \leq \Delta\theta < T_m$

El modelo discretizado queda expresado por (3.7):

$$C_0(\overline{k+1}T_m) = a_{p_1} C_0(kT_m) + b_{p_0} C_{in}(\overline{k-d+1}T_m) + b_{p_1} C_{in}(\overline{k-d}T_m) \quad (3.7)$$

Aplicando la transformada Z y estableciendo las condiciones iniciales iguales a cero se obtienen las ecuaciones dadas por (3.8) y (3.9).

$$C_0(z, T_m) = \frac{b_{p_0}z + b_{p_1}}{z^{d+1} - a_{p_1}z^d} C_{in}(z, T_m) \quad (3.8)$$

$$G_p(z, T_m) = \frac{C_0(z, T_m)}{C_{in}(z, T_m)} = \frac{b_{p_0}z + b_{p_1}}{z^{d+1} - a_{p_1}z^d} \quad (3.9)$$

Los polinomios tanto del numerador como del denominador del sistema se muestran expresados por (3.10).

$$N_p(z, T_m) = b_{p_0}z + b_{p_1}; \quad D_p(z, T_m) = z^{d+1} - a_{p_1}z^d \quad (3.10)$$

Dónde:

$$a_{p_1} = e^{-T_m/\tau_p} \quad (3.11)$$

$$b_{p_0} = \int_0^{T_m - \Delta\theta} e^{-\gamma/\tau_p} \frac{K_p}{\tau_p} d\gamma \quad (3.12)$$

$$b_{p_1} = e^{-(T_m - \Delta\theta)/\tau_p} \int_0^{\Delta\theta} e^{-\gamma/\tau_p} \frac{K_p}{\tau_p} d\gamma \quad (3.13)$$

Tomando el periodo de muestreo tal que $\theta = (d-1)T_m \Rightarrow \Delta\theta = 0$ y como b_{d_1} depende de $\Delta\theta$ en la forma indicada en (3.12) y (3.13) los parámetros quedan como se indica en (3.14) y (3.15)

$$b_{p_0} = \int_0^{T_m} e^{-\gamma/\tau_p} \frac{K_p}{\tau_p} d\gamma \quad (3.14)$$

$$b_{p_1} = e^{-T_m/\tau_p} \int_0^0 e^{-\gamma/\tau_p} \frac{K_p}{\tau_p} d\gamma = 0 \quad (3.15)$$

La función de transferencia discreta que se obtiene está definida por (3.19)

$$G_p(z, T_m) = \frac{b_{p_0}}{z^d - a_{p_1}z^{d-1}} \quad (3.16)$$

Dónde se halla (3.17):

$$\begin{aligned}
 N_p(z, T_m) &= b_{p_0} \quad ; \quad m_p = 0 \\
 D_p(z, T_m) &= z^d - a_{p_1} z^{d-1} \quad ; \quad \eta_p = d \\
 g_d[D_p(z, T_m)] - g_d[N_p(z, T_m)] &= d - 0 = d
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Por lo tanto el modelo de referencia a seguir es $g_d[D_m(z, T_m)] - g_d[N_m(z, T_m)] \geq d$

Tomando $G_m(z, T_m) = \frac{1}{z^d}$ control de muerte súbita. (Ver [36])

La función de transferencia tiene todos sus polos en el origen (muerte súbita)

$$N_m(z, T_m) = 1 \quad ; \quad D_m(z, T_m) = z^d \quad (d \text{ polos en el origen})$$

Dado que $N_p(z, T_m) = b_{p_0}$; $N_m(z, T_m) = 1$ se puede asumir que se cumple la condición de que los ceros del modelo contienen los ceros de la planta. Grado de $N_f(z, T_m)$

$$m_f \geq n_p - 1 \quad ; \quad m_f \geq d - 1 \quad ;$$

Tomando $m_f = d - 1$ se obtiene (3.18)

$$N_f(z, T_m) = b_{f_0} z^{d-1} + b_{f_1} z^{d-2} + \dots + b_{f_{d-2}} z + b_{f_{d-1}} \tag{3.18}$$

En (3.20) se halla el grado de $T(z, T_m)$

$$\ell \geq n_p - n + m_f \quad ; \quad \ell \geq d - d + d - 1 \quad ; \quad \ell \geq d - 1 \tag{3.19}$$

$$T(z, T_m) = z^{d-1} + \gamma_1 z^{d-2} + \dots + \gamma_{d-2} z + \gamma_{d-1} \tag{3.20}$$

$T(z, T_m)$ Se escoge con sus raíces estables bien amortiguadas.

En (3.21) se calcula del polinomio $N_r(z, T_m)$

$$N_r(z, T_m) = \frac{1}{b_{p_0}} (z^{d-1} + \gamma_1 z^{d-2} + \dots + \gamma_{d-2} z + \gamma_{d-1}) \tag{3.21}$$

Con (3.23) se encuentra el grado de $D_c(z, T_m)$

$$n_c = d + (d - 1) - d = d - 1 \quad ; \quad n_c = d - 1 \tag{3.22}$$

$$D_c(z, T_m) = z^{d-1} + a_{c_1} z^{d-2} + \dots + a_{c_{d-2}} z + a_{c_{d-1}} \tag{3.23}$$

La ecuación diofántica es definida por (3.25)

$$D_p(z, T_m) D_c(z, T_m) + N_p(z, T_m) N_f(z, T_m) = T(z, T_m) D_m(z, T_m)$$

$$\left(z^d - a_{p_1} z^{d-1} \right) \left(z^{d-1} + a_{c_1} z^{d-2} + \dots + a_{c_{d-2}} z + a_{c_{d-1}} \right) + b_{p_0} \left(b_{f_0} z^{d-1} + b_{f_1} z^{d-2} + \dots + b_{f_{d-2}} z + b_{f_{d-1}} \right) =$$

$$\left(z^{d-1} + \gamma_1 z^{d-2} + \dots + \gamma_{d-2} z + \gamma_{d-1} \right) z^d \quad (3.24)$$

$$z^{2d-1} + \left(a_{c_1} - a_{p_1} \right) z^{2d-1} + \left(a_{c_2} - a_{p_1} a_{c_1} \right) z^{2d-3} + \left(a_{c_3} - a_{p_1} a_{c_2} \right) z^{2d-4} + \dots + \left(a_{c_{d-2}} - a_{p_1} a_{c_{d-3}} \right) z^{d+1}$$

$$+ \left(a_{c_{d-1}} - a_{p_1} a_{c_{d-2}} \right) z^d + \left(b_{p_0} b_{f_0} - a_{p_1} a_{c_{d-1}} \right) z^{d-1} + b_{p_0} b_{f_1} z^{d-2} + \dots + b_{p_0} b_{f_{d-2}} z + b_{p_0} b_{f_{d-1}} =$$

$$z^{2d-1} + \gamma_1 z^{2d-2} + \dots + \gamma_{d-2} z^{d+1} + \gamma_{d-1} z^d \quad (3.25)$$

Comparando término a término se obtiene (3.26)

$$a_{c_1} - a_{p_1} = \gamma_1 \Rightarrow a_{c_1} = \gamma_1 + a_{p_1}$$

$$a_{c_2} - a_{p_1} a_{c_1} = \gamma_2 \Rightarrow a_{c_2} = \gamma_2 + a_{p_1} a_{c_1} = \gamma_2 + a_{p_1} \gamma_1 + a_{p_1}^2$$

$$a_{c_3} - a_{p_1} a_{c_2} = \gamma_3 \Rightarrow a_{c_3} = \gamma_3 + a_{p_1} a_{c_2} = \gamma_3 + a_{p_1} \gamma_2 + a_{p_1}^2 \gamma_1 + a_{p_1}^3$$

•
•

$$a_{c_{d-2}} - a_{p_1} a_{c_{d-3}} = \gamma_{d-2} \Rightarrow a_{c_{d-2}} = \gamma_{d-2} + a_{p_1} a_{c_{d-3}}$$

$$a_{c_{d-2}} = \gamma_{d-2} + a_{p_1} \gamma_{d-3} + a_{p_1}^2 \gamma_{d-4} + \dots + a_{p_1}^{d-3} \gamma_1 + a_{p_1}^{d-2}$$

$$a_{c_{d-1}} - a_{p_1} a_{c_{d-2}} = \gamma_{d-1} \Rightarrow a_{c_{d-1}} = \gamma_{d-1} + a_{p_1} a_{c_{d-2}}$$

$$a_{c_{d-1}} = \gamma_{d-1} + a_{p_1} \gamma_{d-2} + a_{p_1}^2 \gamma_{d-3} + \dots + a_{p_1}^{d-2} \gamma_1 + a_{p_1}^{d-1}$$

$$b_{p_0} b_{f_0} - a_{p_1} a_{c_{d-1}} = 0 \Rightarrow b_{f_0} = \frac{a_{p_1} a_{c_{d-1}}}{b_{p_0}}$$

$$b_{p_0} b_{f_1} = 0 \Rightarrow b_{f_1} = 0$$

$$b_{p_0} b_{f_2} = 0 \Rightarrow b_{f_2} = 0$$

$$b_{p_0} b_{f_{d-1}} = 0 \Rightarrow b_{f_{d-1}} = 0$$

$$N_f(z; T_m) = b_{f_0} z^{d-1}$$

(3.26)

Asumiendo $T(z, T_m) = z^{d-1}$ se halla (3.27), (3.28), (3.29), (3.30) y (3.31)

$$N_r(z, T_m) = \frac{1}{b_{p_0}} z^{d-1} \quad (3.27)$$

$$a_{c1} = a_{p1}; a_{c2} = a_{p1}^2; a_{c3} = a_{p1}^3, \dots, a_{cd-1} = a_{p1}^{d-1} \quad (3.28)$$

$$b_{f0} = \frac{a_{p1}^d}{b_{p_0}}; b_{f1} = 0; b_{f2} = 0, \dots, b_{fd-1} = 0 \quad (3.29)$$

$$D_c(z, T_m) = z^{d-1} + a_{p1}z^{d-2} + a_{p1}^2z^{d-3} + \dots + a_{p1}z^{d-1} \quad (3.30)$$

$$N_f(z, T_m) = \frac{a_{p1}^d}{b_{p_0}} z^{d-1} \quad (3.31)$$

Con la ecuación (3.32) se halla la expresión de la ley de control del sistema.

$$U(z, T_m) = \frac{N_r(z, T_m)}{D_c(z, T_m)} R(z, T_m) - \frac{N_f(z, T_m)}{D_c(z, T_m)} Y(z, T_m) \quad (3.32)$$

Esta ley de control se puede expresar también como (3.33) y (3.34)

$$D_c(z^{-1}, T_m) U(z^{-1}, T_m) = N_r(z^{-1}, T_m) R(z^{-1}, T_m) - N_f(z^{-1}, T_m) Y(z^{-1}, T_m) \quad (3.33)$$

$$U(z^{-1}, T_m) + a_{p_1} z^{-1} U(z^{-1}, T_m) + a_{p_1}^2 z^{-2} U(z^{-1}, T_m) + \dots + a_{p_1}^{d-1} z^{-(d-1)} U(z^{-1}, T_m) = \frac{1}{b_{p_0}} R(z^{-1}, T_m) - \frac{a_{p_1}^d}{b_{p_0}} Y(z^{-1}, T_m) \quad (3.34)$$

En el dominio del tiempo se obtiene (3.35)

$$u(kT_m) + a_{p_1} u[(k-1)T_m] + a_{p_1}^2 u[(k-2)T_m] + \dots + a_{p_1}^{d-1} u[(k-d+1)T_m] = \frac{1}{b_{p_0}} r(kT_m) - \frac{a_{p_1}^d}{b_{p_0}} y(kT_m) \quad (3.35)$$

El algoritmo para implementación discreta está definido por (3.36)

$$u(kT_m) = -a_{p_1} u[(k-1)T_m] - a_{p_1}^2 u[(k-2)T_m] - \dots - a_{p_1}^{d-1} u[(k-d+1)T_m] + \frac{1}{b_{p_0}} r(kT_m) - \frac{a_{p_1}^d}{b_{p_0}} y(kT_m) \quad (3.36)$$

3.6 CONTROL MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

Teniendo en cuenta [37] y [38], la lógica difusa puede ser descrita como un sistema interpretativo como se aprecia en la Figura 3.6. En este método los objetos o elementos, están relacionados con conjuntos de fronteras no nítidamente definidas, otorgándoles un grado de pertenencia relativo o graduado y no es estricta como de costumbre en la lógica tradicional, es decir existe una intersección entre un conjunto y otro, esto permite interpretar de una mejor manera el estado de las variables de cierto proceso, asignándoles en cada momento un grado de pertenencia a estos conjuntos difusos; esta interpretación puede estar relacionada mediante operadores lógicos comunes con ciertas medidas de acción, estas medidas son diseñadas de tal manera que realicen un cambio deseado en las variables del proceso, es decir que se puede diseñar un controlador que interprete de manera intuitiva el estado de las variables y mediante esto, poder deducir en forma lógica una acción que permita llevar la variable al estado deseado.

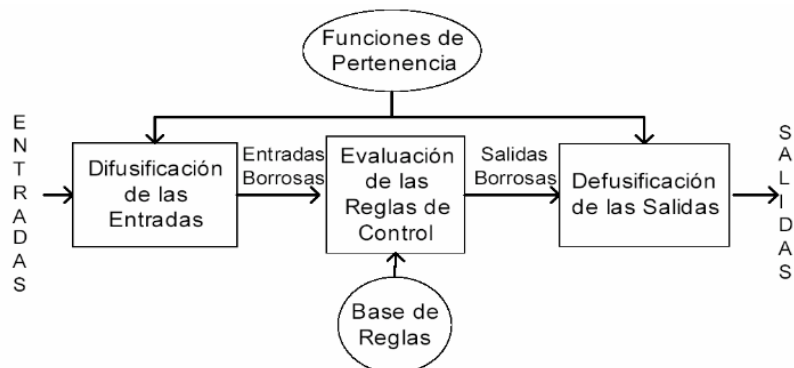


Figura 3.6 Esquema controlador mediante lógica difusa.

Fuente: Capítulo 1 Lógica Difusa y Sistemas de Control, Universidad de Piura.

3.6.1 Conjuntos

Los conjuntos son asociados a un valor lingüístico, definido por una palabra o una etiqueta. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, por lo tanto se comprende que el grado de la variable x está incluida en el conjunto representado por la etiqueta A donde $(0 \leq \mu_A(x) \leq 1)$, donde si el valor de la función corresponde a 0 significa que tal valor de x no está incluido en A . En la Figura 3.7 se puede apreciar un ejemplo donde el conjunto velocidad (con variable x esta subdividido en tres subconjuntos $\{Baja, Media, Alta\}$, con sus respectivas funciones de pertenencia $\{\mu_{Baja}(x), \mu_{Media}(x), \mu_{Alta}(x)\}$. Para mayor información [39].

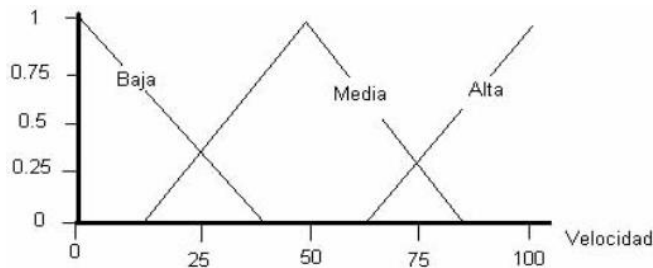
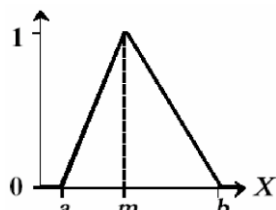


Figura 3.7 Ejemplo de subconjuntos para el conjunto velocidad.

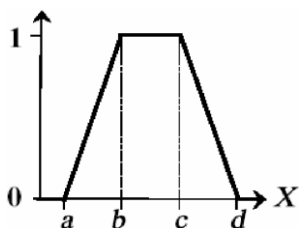
3.6.2 Funciones de Pertenencia

Las funciones de pertenencia representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta. Existe una variedad de formas para las funciones de membresía, las más comunes son el tipo triangular (Figura 3.8a), trapezoidal, (Figura 3.8b), S (Figura 3.8c) y singleton (Figura 3.8d).



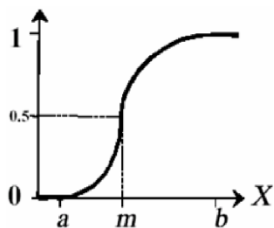
$$A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x - a)/(m - a), & x \in (a, m] \\ (b - x)/(b - m), & x \in (m, b) \\ 1, & x \geq b \end{cases}$$

Figura 3.8a Forma triangular.



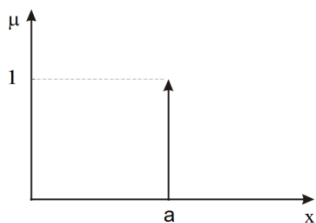
$$A(x) = \begin{cases} 0, & (x \leq a) \vee (x \geq d) \\ (x - a)/(b - a), & x \in (a, b] \\ 1, & x \in (b, c) \\ (d - x)/(d - c), & x \in (c, d) \end{cases}$$

Figura 3.8b Forma trapezoidal.



$$A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2[(x - a)/(b - a)]^2, & x \in (a, m] \\ 1 - 2[(b - x)/(b - m)]^2, & x \in (m, b) \\ 1, & x \geq b \end{cases}$$

Figura 3.8c Forma S.



$$A(x) = \begin{cases} 1, & x = a \\ 0, & x \neq a \end{cases}$$

Figura 3.8d Forma singleton.

3.6.3 Operaciones entre Subconjuntos

A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos. Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y modelos difusos, son necesarias en la evaluación del antecedente de reglas (y otras etapas).

Se definen a continuación tres operaciones básicas a realizar sobre los conjuntos, estas operaciones son complemento, unión e intersección. Sean las etiquetas A y B las que identifican a dos conjuntos borrosos asociados a una variable lingüística x. En la Tabla 3.3 se presentan las operaciones entre subconjuntos; así como la representación gráfica de las operaciones lógicas AND (Figura 3.9a), OR (Figura 3.9b) y NOT (Figura 3.9c) [40].

Tabla 3.3 Operaciones entre subconjuntos.

<i>Operación</i>	<i>Representación</i>
Complemento. Operador lógico NOT	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
Unión. Operador lógico OR de Zadeh(max)	$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$
Intersección. Operador lógico AND de Zadeh(min)	$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$
Operador lógico AND del producto	$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$
Operador lógico OR de Lukasiewicz	$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x) + \mu_B(x), 1]$

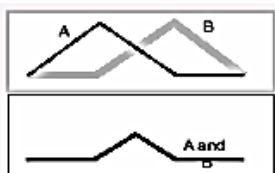


Figura 3.9a Operación AND.

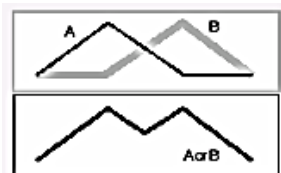


Figura 3.9b Operación OR.

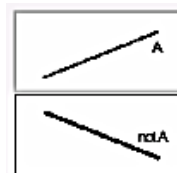


Figura 3.9c Operación NOT.

3.6.4 Fusificación

El control difuso siempre involucra este proceso de fusificación, esta operación se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de pertenencia a las cuales pertenece.

3.6.5 Defusificación

El control difuso es un control mediante palabras que interpretan el sentido común, en lugar de números; sin embargo las variables de los procesos se miden en números por lo que se hace necesario una adaptación previa a introducir el estado de las variables en el controlador, para esto es necesario realizar una etapa de defusificación con la cual se transforman las variables para que el controlador envíe los datos correctos al actuador. La representación del esquema para la implementación del controlador mediante lógica difusa se puede apreciar en la Figura 3.10 (Ver más en [41]).

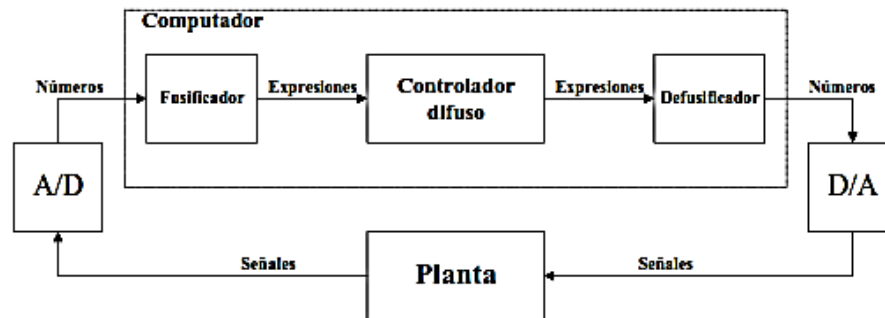


Figura 3.10 Lazo de control difuso.

3.7 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES

Según [42], una de las maneras más efectivas de realizar un diseño de control, consiste en plasmar el objetivo de control como una función de los estados. Luego, mediante conmutaciones a frecuencia muy elevada, idealmente infinita, se fuerza a las trayectorias del sistema a evolucionar sobre la variedad determinada por la restricción planteada, en el espacio de estados. A este modo de funcionamiento ilustrado en la Figura 3.11a, se le denomina operación por modos deslizantes (MD). Se caracteriza por ser altamente robusto o invariante ante cierto tipo de perturbaciones externas y variaciones en los parámetros del sistema. Además, la operación en modo deslizante es de orden reducido, quedando fijada tal dinámica por la función de restricción diseñada. Cuando la frecuencia de conmutación no es infinita, como sucede en cualquier implementación práctica, o en el caso de que no existan dinámicas no modeladas, las conmutaciones generan oscilaciones de amplitud finita y alta frecuencia en las trayectorias a evolucionar sobre la variedad de deslizamiento. La Figura 3.11b muestra una idea de este fenómeno. Para mayor información ver [43], [44] y [45].

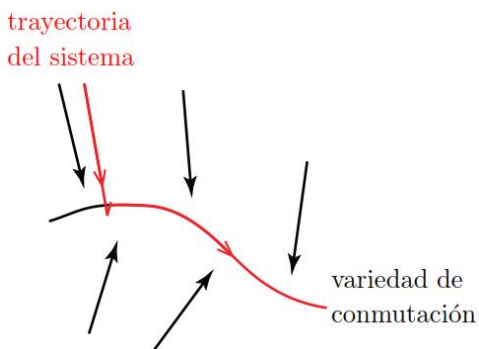


Figura 3.11a Commutaciones a frecuencia infinita.

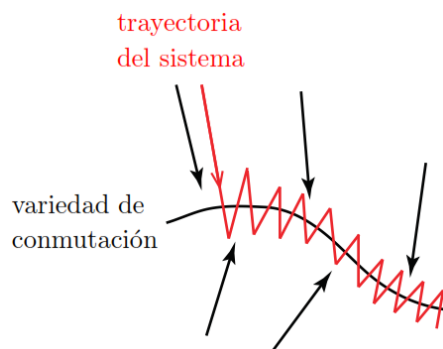


Figura 3.11b Commutaciones a frecuencia finita.

Los modos deslizantes resulta una de las alternativas más atractivas para controlar sistemas con incertidumbre en los parámetros y perturbaciones, sobre todo en sistemas mecánicos controlados electrónicamente. En adición a las ventajas en cuanto a robustez y a la reducción del orden dinámico, el diseño de los controladores por MD suele ser relativamente sencillo, pudiendo aplicarse tanto sobre sistemas lineales como no lineales y admitiendo ser combinado con otras técnicas de control. La idea básica del control por modo deslizante (CMD) consiste en llevar las trayectorias del sistema sobre una variedad o superficie de deslizamiento y forzarlas a evolucionar sobre ella. Así, el comportamiento dinámico del sistema en estas condiciones queda determinado por las ecuaciones que definen dicha superficie en el espacio de estados. De este modo, plasmando los objetivos de control en tales ecuaciones mediante un diseño adecuado de las mismas, es posible lograr la estabilización del sistema, el seguimiento de referencias y la regulación de variables.

La ecuación (3.37) representa el comienzo para hallar la señal de control por MD

$$e(t) = y(t) - y_d \quad (3.37)$$

Donde $e(t)$ es el error en el sistema, $y(t)$ es la referencia y y_d es la variable medida.

A partir de la superficie representada por (3.38) se encuentran los parámetros K_p y K_i los cuales son constantes definidas en el sistema

$$z(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.38)$$

De esta forma se obtiene la señal de control del sistema definida por (3.39)

$$u(t) = \Gamma_0 \text{sig}[z(t)] \quad (3.39)$$

Donde su propósito es lograr que la superficie deslizante $z(t) \rightarrow 0$

A partir de (3.39) se encuentra (3.40)

$$K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau = 0 \quad (3.40)$$

Por lo tanto la solución queda interpretada por (3.41)

$$K_p \dot{e}(t) + K_i e(t) = 0 \quad (3.41)$$

Despejando $\dot{e}(t)$ de (3.41) encontramos (3.42)

$$\dot{e}(t) = -\frac{K_i}{K_p} e(t) \quad (3.42)$$

La ecuación (3.43) representa el objetivo del controlador para conseguir que $e(t) \rightarrow 0$

$$e(t) = e(t_0) e^{-\frac{K_i}{K_p}*(t-t_0)} \quad (3.43)$$

Capítulo 4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

4.1 ESTRUCTURA FÍSICA DEL PROTOTIPO

4.1.1 Interconexión de Tanques

Para la conexión de los tanques superiores con el tanque reactor se utilizan dos materiales. En la conexión del tanque que contiene el agua ácida a tratar se usa tubería CPVC y PVC de 1/2". Para la conexión entre el tanque que almacena el químico neutralizante se usa una manguera de 3/8".

4.2 DISEÑO DEL PROTOTIPO

La estructura del prototipo para el tratamiento de las aguas ácidas provenientes de los efluentes mineros, se diseñó teniendo en cuenta las dimensiones del volumen de agua a tratar en una escala reducida por esa razón se sigue los pasos descritos por el diagrama de flujo del diseño del prototipo (ver Figura 4.1a). El prototipo consta de cuatro tanques, uno de ellos para almacenar las aguas ácidas a tratar, un segundo tanque para contener el químico para poder tratar los efluentes mineros líquidos, en este caso se utiliza soda cáustica (NaOH) como agente neutralizante, el tercer tanque cumple la función de tanque reactor donde se llevará a cabo la neutralización de la acidez de dichas aguas, y en el cuarto tanque se almacenara los efluentes neutralizados. La Figuras 4.1b y 4.1c ilustran el diagrama del prototipo y el prototipo implementado.

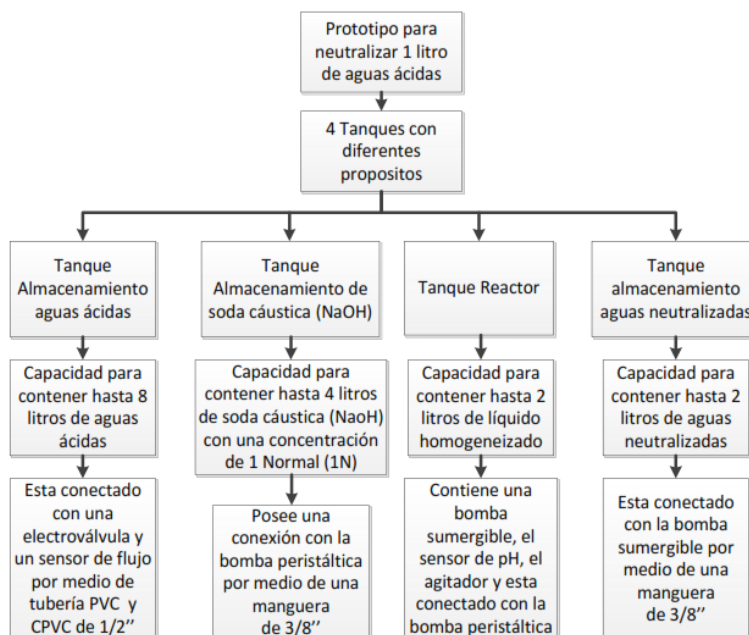


Figura 4.1a Diagrama de flujo diseño del prototipo.

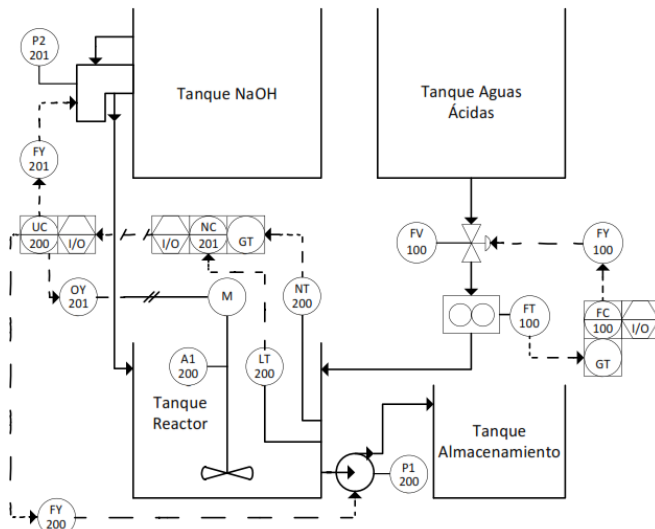


Figura 4.1b Diagrama del prototipo implementado.

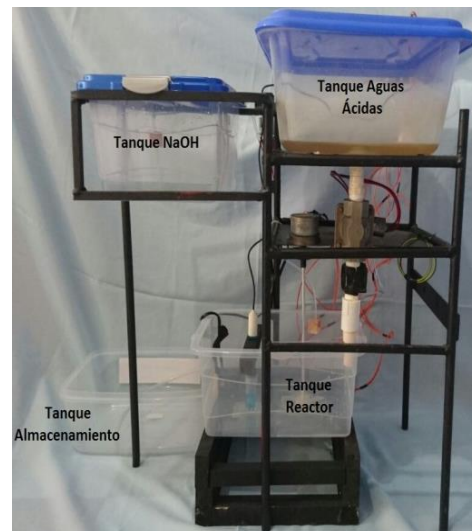


Figura 4.1c Prototipo implementado.

En la Tabla 4.1 se describen los elementos principales para llevar a cabo la neutralización de las aguas ácidas.

Tabla 4.1 Descripción elementos del diagrama del prototipo.

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
A1-200	Agitador
FC-100	Tarjeta de procesamiento
FT-100	Sensor de Flujo
FV-100	Válvula
LT-200	Sensor de Nivel
NC-201	Tarjeta de procesamiento
NT-200	Sensor de pH
P1-200	Bomba Sumergible
P2-201	Bomba Peristáltica

4.3 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Se relacionan los sensores, actuadores y dispositivos electrónicos que se implementaron en el prototipo. Además se presenta el módulo de instrumentación y procesamiento de señales que permite la adquisición de datos y manipulación del sistema. El circuito implementado tanto para las etapas de potencia como la adquisición de señales se puede observar en el Anexo 2 y Anexo 3.

4.3.1 Sensores

Tomando como referencia la estructura de la planta de tratamiento se realiza un análisis de los sensores más apropiados para implementar y realizar la medición de las variables generadas por el sistema.

4.3.1.1 Sensor de pH

Un sensor de pH común incorpora un sensor de vidrio y un tubo de referencia. La sonda de pH mide la actividad de los iones de hidrógeno mediante la generación de una pequeña cantidad de tensión en el sensor y el tubo de referencia. De esta manera se obtiene un voltaje diferente para cada nivel de pH [46].

En la Tabla 4.2 se observa la comparación de varios sensores de pH encontrados en el mercado.

Tabla 4.2 Comparación sensores de pH.

<i>Sensor de pH</i>	<i>Amplificador de señal</i>	<i>Rango de Medida (pH)</i>	<i>Precisión (pH)</i>	<i>Precio (COP)</i>
Hach PD2PI	Si	0-14	± 0.02	\$ 2'037.900
Hannah Instruments HI 1618D	Si	0-14	± 0.05	\$ 591.987
HI 1230B	No	0-13	± 0.05	\$ 388.124
DFROBOT SEN0169	Si	0-14	± 0.1	\$ 307.400
SEN0161	Si	0-14	± 0.1	\$ 145.000
VKtech Genérico	No	0-12	± 0.5	\$ 78.000

El sensor de pH que se escoge para el prototipo tiene como referencia SEN0161 diseñado por DFROBOT [47]; debido a que cumple con las características necesarias para llevar a cabo la medición de pH entre ellas que posee una precisión del ± 0.1 . También proporciona circuito interfaz que amplifica la señal de voltaje entregado por el sensor, lo cual facilita la adquisición de esta señal y su precio se ajusta al presupuesto del proyecto.

Este sensor de pH posee una conexión BNC (ver Anexo 4), tiene como objetivo llevar a cabo la medición de pH en el reactor donde se realizará la neutralización de las aguas acidas. Este sensor de pH entrega un rango de voltaje que varía desde -414mV hasta los 414mV, estos datos provienen del fabricante, como se muestra en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.2a. Para poder tener un rango de voltaje mayor el fabricante suministra un circuito (ver Anexo 5) el cual posee una conexión BNC. Este circuito funciona como interfaz de potencia para aumentar el voltaje dado por el sensor de pH. Este nuevo voltaje tiene un rango de 0V a 4V, como se describe en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.2b. Las Tablas 4.4 y 4.5 detallan especificaciones más relevantes tanto del sensor como del circuito interfaz. En las Figuras 4.3a y 4.3b se observa el sensor y el circuito interfaz pH meter.

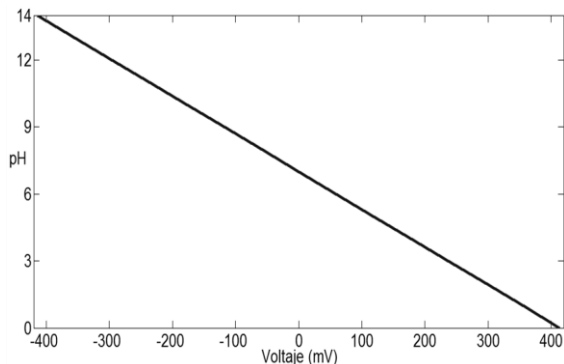


Figura 4.2a Rango de voltaje sensor de pH.

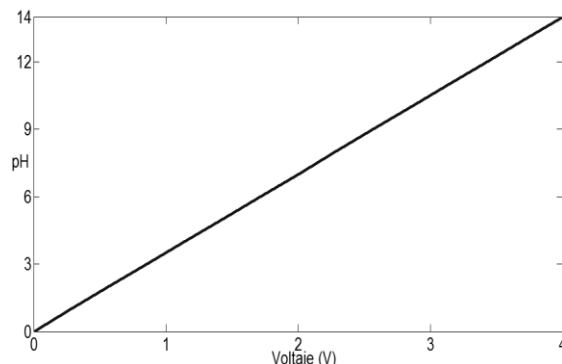


Figura 4.2b Rango de voltaje circuito interfaz.

Tabla 4.3 Rango de voltaje sensor de pH.

<i>Voltaje (mV)</i>	<i>Valor de pH</i>	<i>Voltaje Circuito Interfaz (V)</i>
414.12	0	0
354.96	1	0.286
295.80	2	0.571
236.64	3	0.857
177.48	4	1.143
118.32	5	1.429
59.16	6	1.714
0.00	7	2
-59.16	8	2.286
-118.32	9	2.571
-177.48	10	2.857
-236.64	11	3.143
-295.80	12	3.429
-354.96	13	3.714
-414.12	14	4

Tabla 4.4 Especificaciones sensor de pH.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Voltaje de funcionamiento	5Vdc
Rango de medida	0 – 14
Temperatura de medida	0 a 60°C
Precisión	± 0.1pH (25 °C)
Tiempo de respuesta	≤ 1 min
Tipo de Conector	BNC

Tabla 4.5 Especificaciones circuito interfaz.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Voltaje de funcionamiento	5Vdc
Tamaño placa de circuito	43mm×32mm
Tipo de Conector	BNC



Figura 4.3a Sensor de pH SKU: SEN0161.

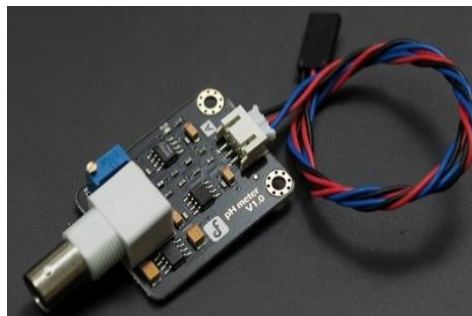


Figura 4.3b Circuito interfaz pH meter V1.0.

4.3.1.2 Sensor de flujo

El sensor de flujo [48] está constituido por un cuerpo de plástico, un rotor, y un sensor de efecto Hall. El diseño y el funcionamiento de este tipo de sensor es simple. El sistema, similar a un molino de viento, tiene un pequeño imán atado y un sensor magnético de efecto Hall en el otro lado del tubo, para registrar cada vuelta del molino. De este modo se generan pulsos en la salida del sensor de velocidad a una tasa proporcional a la velocidad de flujo. Al contar los pulsos generados por el sensor se puede calcular la cantidad de flujo que circula por este sensor.

En la Tabla 4.6 se detallan las características de varios sensores de flujo encontrados en el mercado.

Tabla 4.6 Comparación sensores de flujo.

<i>Sensor de flujo</i>	<i>Rango de medida (l/min)</i>	<i>Conexión a tubería</i>	<i>Precio (COP)</i>
Krohne VN0344 VN30	800 – 35000	1"	\$ 9'900.718
SEA Dn32	1 – 120	1.25"	\$ 81.100
YF-S401	0.3 - 6	1/4 "	\$ 25.000
YF-S201	1 - 30	1/2"	\$ 21.960
Genérico FS400A	1 – 60	1"	\$ 80.000
FS300A	1 – 60	3/4"	\$ 45.000

El sensor de flujo seleccionado para determinar la cantidad de efluentes mineros líquidos a tratar tiene como referencia YF-S201 y es diseñado por SEA (ver Anexo 6). Este sensor se adapta a la tubería de 1/2" conectada en el tanque de almacenamiento de aguas ácidas, además de poseer un rango de medida considerable (1 – 30 l/min) para detectar el paso de 1 litro de las aguas ácidas hacia el tanque reactor. Las especificaciones más relevantes del sensor se muestran en la Tabla 4.7 y el sensor se puede observar en la Figura 4.4.

Tabla 4.7 Especificaciones sensor de flujo.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Voltaje de funcionamiento	5-18Vdc
Máxima corriente de operación	15mA a 5Vdc
Voltaje de salida	5V TTL
Velocidad de flujo	1 a 30 l/min
Rango de Temperatura	-25 a 80 °C
Precisión	± 10%
Pulsos por litro	450
Conexión a tubería	1/2"
Tamaño	2.5" x 1.4" x 1.4"



Figura 4.4 Sensor de flujo YF-S201.

4.3.1.3 Sensor de nivel

El sensor de nivel escogido para que sirva de respaldo en caso de que el sensor de flujo no funcione correctamente al medir la cantidad de agua ácida que circula por él, es un sensor ON/OFF ubicado en el tanque reactor con el fin de enviar un voltaje diferente hacia la tarjeta Arduino UNO, cuando el tanque reactor se encuentra vacío y cuando posee 1 litro de aguas ácidas. Este sensor se escoge debido a la comodidad en la implementación del circuito y su buen desempeño en las aguas ácidas. El circuito del sensor de nivel implementado se observa en la Figura 4.5.

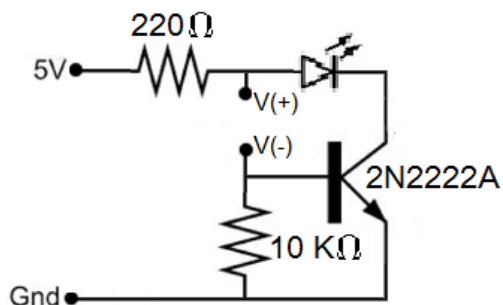


Figura 4.5 Sensor de nivel ON/OFF

4.3.2 Actuadores

Son dispositivos destinados a la conversión de magnitudes eléctricas en una salida usualmente de tipo mecánica con el fin de causar un efecto sobre un proceso.

4.3.2.1 Electroválvula

De acuerdo con [49] una electroválvula está compuesta por dos partes, una cabeza magnética constituida principalmente por una bobina, tubo, culata, anillo de desfasado, resorte(s). Y un cuerpo, con orificios de racordaje, obturados por clapet, membrana, pistón, etc. según el tipo de tecnología empleada. La apertura y el cierre de la electroválvula están unidos a la posición del núcleo móvil que se desplaza bajo el efecto del campo magnético provocado por la puesta con tensión de la bobina. La electroválvula implementada en el prototipo (ver Anexo 7) es de mando directo, donde el núcleo está unido mecánicamente al clapet que abre o cierra el orificio, según la bobina esté alimentada o no (Ver Figura 4.6). El funcionamiento es independiente del caudal y de la presión (nula o máxima). En esta versión la electroválvula se encuentra en un estado normalmente cerrado.

La electroválvula seleccionada para el prototipo tiene como referencia 8320G184 diseñada por ASCO, tiene una conexión a tubería de 1/2". Esta electroválvula se encuentra instalada con el tanque de almacenamiento de aguas ácidas por lo tanto no fue necesario buscar otras en el mercado. Las especificaciones más relevantes se encuentran detalladas en la Tabla 4.8 y en la Figura 4.7 se muestra la electroválvula.

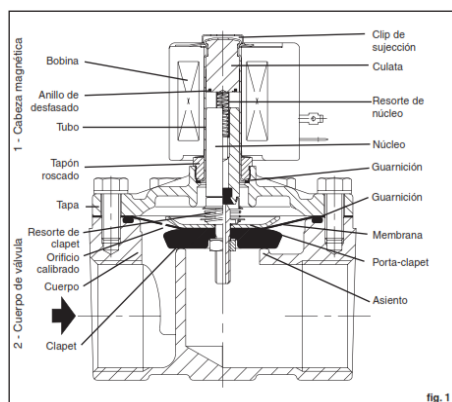


Figura 4.6 Partes electroválvula.

Tabla 4.8 Especificaciones electroválvula.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Voltaje de funcionamiento	110Vac
Máxima presión	150 PSI
Conexión a tubería	1/2"
Tipo	Mando directo
Versión	NC



Figura 4.7 Electroválvula 8320G184.

4.3.2.2 Bomba Peristáltica

La función de las bombas peristálticas [50] imita el sistema de digestión humana conocido como movimiento “peristáltico” consistente en la contracción y sucesiva relajación de un músculo alrededor de un tubo para de este modo mover su contenido. En el caso de la bomba, un tubo flexible es aplastado continuamente por rodillos colocados adecuadamente. Entre un paso y el otro del rodillo impulsor, el tubo recupera su diámetro original generando un vacío para transportar el producto a bombear. El mecanismo más común cuenta con dos o tres rodillos que giran en un compartimiento circular comprimiendo en forma progresiva una manguera especial flexible.

Los rodillos están unidos con el eje del motor a través de algún mecanismo, de manera que al girar el mismo, estos presionan la manguera en forma progresiva y hacen avanzar el contenido dentro de la misma. En este sistema el contenido que está siendo bombeado nunca está en contacto con el mecanismo, sólo con el interior del conducto. La velocidad del bombeo puede ser lenta según lo requiera el proceso. En la Figura 4.8a se muestra el funcionamiento de una bomba peristáltica de tres rodillos. Las características de las bombas peristálticas encontradas en el mercado se observan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Comparación bombas peristálticas.

Bomba peristáltica	Flujo (ml/min)	Alimentación	Precio (COP)
Stenner Pump Company QP255-1	0 - 222	110 Vac	\$ 867.682
Symply Pumps PM200F	0 – 200	12 Vdc	\$ 316.136
ZJChao B00KJ5X1NY	0 – 100	12 Vdc	\$ 75.000

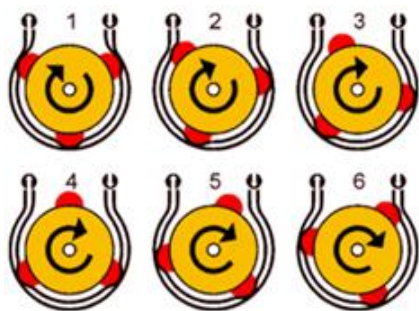


Figura 4.8a Fases de funcionamiento.



Figura 4.8b Bomba peristáltica SKU: B00KJ5X1NY.

La bomba peristáltica diseñada por ZJCHAO con referencia B00KJ5X1NY es la bomba escogida para controlar la cantidad del químico neutralizante; soda cáustica (NaOH) que es agregada al tanque reactor. Es la bomba seleccionada porque se necesita adicionar cantidades pequeñas de soda caustica (NaOH) y esta cumple con los requisitos (0 – 100 ml/min). Las especificaciones más relevantes se aprecian en la Tabla 4.10 y en la Figura 4.8b se observa la bomba peristáltica.

Tabla 4.10 Especificaciones bomba peristáltica.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Voltaje de funcionamiento	12Vdc
Corriente mínima	80mA
Cantidad de flujo	0-100 ml/min
Velocidad	0.1 – 100 RPM

4.3.2.3 Motorreductor AC

Según [51] este tipo de motor tiene características especiales ya que es un motor síncrono de baja velocidad, bidireccional y de funcionamiento silencioso. Está diseñado a base de engranajes, mecanismos circulares y dentados con geometrías especiales de acuerdo con su tamaño y la función en cada motor. En pocas palabras los reductores son sistemas de engranajes que permiten que los motores eléctricos funcionen a diferentes velocidades para las que fueron diseñados. Rara vez las máquinas funcionan de acuerdo con las velocidades que les ofrece el motor, por ejemplo, a 1.800, 1.600 o 3.600 revoluciones por minuto. La función de un motorreductor es disminuir la velocidad de los motores (50, 60, 100 rpm) y permitir el eficiente funcionamiento de las máquinas, agregándole por otro lado potencia y fuerza.

El motorreductor seleccionado para el prototipo es fabricado por CRAMER DIVISION, tiene como referencia H31YDAB0, su función consiste en desempeñarse como un agitador en el tanque reactor para mezclar el químico neutralizante (NaOH) con los efluentes mineros líquidos.. En la Tabla 4.11 se muestran las especificaciones del motorreductor y en la Figura 4.9 se observa el motorreductor.

Tabla 4.7 Especificaciones motorreductor AC.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Voltaje de funcionamiento	110Vac
Potencia	2.7W
Velocidad	120 RPM



Figura 4.9 Motorreductor SKU: H31YDAB0.

4.3.2.4 Bomba Sumergible

Las bombas sumergibles [52] son máquinas capaces de impulsar líquidos estando sumergidas en agua o en cualquier líquido, incluso a grandes profundidades. Se caracterizan por ser la unión del cuerpo de la bomba y el motor. Ambos están sumergidos por estar instalados en la misma estructura. A diferencia de otros tipos de bombas, las sumergibles no dependen de la presión del aire que las rodea, por lo tanto, pueden impulsar los líquidos a alturas considerables. Tanto el motor como la hélice están sellados herméticamente. Esta situación podría provocar la elevación en la temperatura en la bomba. Para solucionar este inconveniente, el propio líquido que fluye por la bomba

debe funcionar como refrigerante. Las características de las bombas sumergibles encontradas en el mercado se observan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Comparación bombas sumergibles.

<i>Bomba sumergible</i>	<i>Flujo (l/min)</i>	<i>Altura máxima (m)</i>	<i>Precio (COP)</i>
Evans			
AQUA60W	18	2	\$ 179.900
AQUA45W	15	2	\$ 149.900
Aquatop			
Swp-480	12	1	\$ 127.900
Lawn Industry			
WP-300	2.5	0.5	\$ 25.000
Genérico			
310	10	1	\$ 80.000
AS 180	4.17	0.2	\$ 32.000

La bomba sumergible [53] que se escoge tiene como referencia WP-300 la cual es fabricada por LAWN INDUSTRY (ver Anexo 8), esta bomba tiene como función extraer el agua tratada del tanque reactor. La bomba sumergible cumple con las condiciones de altura máxima de elevación (0.5 m), esta altura es suficiente debido a que el tanque reactor tiene una altura que no sobrepasa los 40cm. Las características técnicas de la bomba sumergible se muestran en la Tabla 4.13 y en la Figura 4.10 se aprecia dicha bomba.

Tabla 4.13 Especificaciones bomba sumergible.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Voltaje de funcionamiento	110Vac
Potencia	2.5 W
Flujo máximo	2.5 l/min
Altura máxima	0.5 m



Figura 4.10 Bomba sumergible SKU: WP-300.

4.3.3 Tarjetas de Procesamiento

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios (para mayor información [54] y [55]). Se usan dos tarjetas Arduino, una de ellas es (MEGA 2560) y la otra es (UNO). Se escogen estas tarjetas Arduino debido a que el proceso de neutralización de las aguas ácidas es lento. Por lo tanto no es necesario un periodo de muestreo demasiado exigente en la medición de las variables, además de que pueden ser enlazadas con el programa Matlab[®] – Simulink[®] donde se controlan los pasos para el tratamiento de las aguas ácidas y se procesan las variables que intervienen en el proceso.

4.3.3.1 Arduino UNO

Arduino UNO [56] es una placa electrónica basada en el ATmega328P. Cuenta con 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se podrán utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para energizar el microcontrolador basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB, con un adaptador de CA a CC o una batería. Esta tarjeta es controlada desde Matlab[®] – Simulink[®] para un manejo más versátil de los algoritmos de control además de enviar señales digitales a la tarjeta Arduino MEGA 2560 y procesar la señal analógica procedente del sensor de pH, de esta forma no se tiene problemas en la pérdida de datos del sensor de pH. Estas señales digitales seleccionan el proceso que se va a llevar a cabo el prototipo (llenado de tanque reactor, neutralización de aguas ácidas, drenaje de aguas tratadas). En la Tabla 4.14 y la Figura 4.11 se describen sus características y la tarjeta.

Tabla 4.14 Características Arduino UNO.

<i>Características</i>	<i>Especificación</i>
Fabricante	Atmel
Modelo	Uno
Pines Digitales	14
Puertos analógicos	6
Memoria programable	32KB
SRAM	2KB
Velocidad de Reloj	16MHz

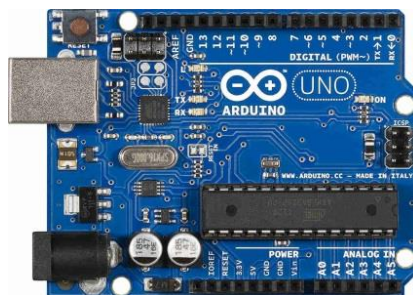


Figura 4.11 Tarjeta Arduino UNO.

4.3.3.2 Arduino MEGA 2560

Arduino Mega 2560 [57] es una placa electrónica basada en el Atmega2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. La tarjeta MEGA 2560 es compatible con la mayoría de los shield para Arduino Uno y las anteriores juntas de Duemilanove o Diecimila. Esta tarjeta recibe los datos de los controladores enviados de forma serial desde Matlab[®] – Simulink[®] y procesarlos para generar una señal PWM que controla la velocidad de la bomba

peristáltica. Esta tarjeta también controla los procesos que se llevan a cabo en el prototipo (llenado de tanque reactor, neutralización de aguas ácidas, drenaje de aguas tratadas). En la Tabla 4.15 y la Figura 4.12 se detallan sus características y la tarjeta.



Figura 4.12 Tarjeta Arduino MEGA 2560.

Tabla 4.15 Características Arduino MEGA 2560.

<i>Características</i>	<i>Especificación</i>
Fabricante	Atmel
Modelo	MEGA 2560
Pines Digitales	54
Pines PWM	15
Corriente por pin	20mA
Puertos analógicos	16
Memoria programable	256KB
SRAM	8KB
Velocidad de Reloj	16MHz

4.3.4 Módulo Bomba Peristáltica.

Para el manejo del motor de la bomba peristáltica se utiliza el driver de referencia L298N [58]. Este módulo basado en el chip L298N tiene un driver de doble puente H, además permite controlar dos motores de corriente continua o un motor paso a paso bipolar de hasta 2A. El módulo cuenta con todos los componentes necesarios como lo son diodos de protección y un regulador LM7805 que suministra 5V a la parte lógica del integrado L298N. Cuenta con jumpers de selección para habilitar cada una de las salidas del módulo, además de tener 2 terminales de control para cada salida de los motores. Existen dos maneras de alimentar este módulo, una de estas permite la alimentación entre 6V y 12V DC. El otro modo de alimentación es de 5V. Cada modo de alimentación depende de la corriente que necesite el motor para poder funcionar. El modulo tiene un jumper de selección para la alimentación requerida.

El módulo seleccionado, está configurado para que sea alimentado con una fuente externa, ya que el motor de la bomba peristáltica necesita un voltaje mayor o igual a 12VDC, de esta manera la bomba peristáltica funcionará de la manera correcta. En la Tabla 4.16 y la Figura 4.13 se muestran las características y el modulo.

Tabla 4.16 Especificaciones módulo L298N.

Especificación	Medida
Voltaje de funcionamiento	7 - 46Vdc
Corriente máxima	2A
Voltaje de control	5Vdc
Corriente de control	36mA
Potencia	25W
Temperatura de operación	-20 a 135 °C

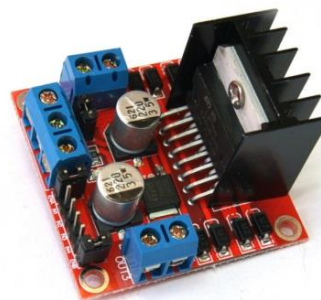


Figura 4.13 Módulo L298N.

4.3.5 Conexión Acople de Fuentes

Debido a que el voltaje de alimentación tanto del motorreductor como de la electroválvula es a 120Vac, se requiere de una etapa de conexión entre las salidas digitales de la tarjeta Arduino (MEGA 2560) con el fin de aislar la tarjeta de los elementos mencionados anteriormente. Esta etapa de conexión se realiza mediante relés de 5Vdc. Se escogen los relés debido a que no se necesita una gran velocidad de conmutación en los contactos. En las Figuras 4.14a y 4.14b se muestran el relé implementado (ver Anexo 9) y su debida conexión con las salidas de la tarjeta Arduino.



Figura 4.14a Relé 5Vdc.

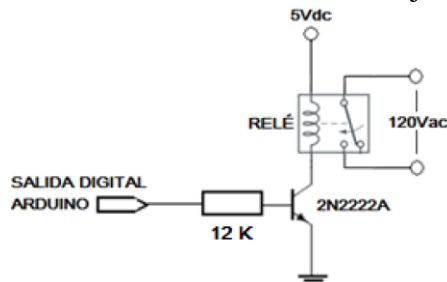


Figura 4.14b Conexión salida digital tarjeta Arduino con relé.

4.3.6 Fuente de Alimentación

La etapa de alimentación se desarrolló teniendo presente las necesidades del hardware del proyecto. Se requiere suministrar energía al módulo L298N debido que la bomba peristáltica necesita un voltaje externo de 14 voltios para funcionar correctamente. Por lo tanto se escoge una fuente regulada de referencia BK-1502TA fabricada por BAKU (para más detalles véase la hoja técnica [59]). En la Tabla 4.17 y la Figura 4.15 se observan sus especificaciones y la fuente.

Tabla 4.17 Especificaciones fuente regulada BK-1502TA.

Especificación	Medida
Voltaje de funcionamiento	220Vac
Voltaje de salida	0-15Vdc
Corriente de salida	0.6 – 2.1A
Potencia de salida	400 – 500W
Condiciones de trabajo	-10 a 40°C
Precisión	± 0.5%



Figura 4.15 Fuente regulada BK-1502TA

4.3.7 Dispositivos Seleccionados

En la Tabla 4.18 se puede observar la lista de los componentes implementados en el prototipo, así como su debida ubicación (ver Figura 4.16).

Tabla 4.18 Descripción de dispositivos seleccionados.

<i>Descripción</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Elemento</i>
Agitador	A1-200	Agitador
Tarjeta de Procesamiento	FC-100	Tarjeta Arduino MEGA 2560
Sensor de Flujo	FT-100	YF-S201
Válvula	FV-100	Electroválvula 8320G184
Relé válvula	FY-100	Relé Electroválvula 5Vdc
Relé Bomba Sumergible	FY-200	Relé Bomba Sumergible 5Vdc
Módulo Bomba Peristáltica	FY-201	Módulo L298N
Sensor de Nivel	LT-200	Sensor de Nivel ON/OFF
Motorreductor AC	M	H31YDAB0
Tarjeta de Procesamiento	NC-201	Tarjeta Arduino UNO
Sensor de pH	NT-200	SEN0161
Relé Motorreductor AC	OY-201	Relé Motorreductor AC 5Vdc
Bomba Sumergible	P1-200	WP-300
Bomba Peristáltica	P2-201	B00KJ5X1NY
Tarjeta de Procesamiento	UC-200	Tarjeta Arduino MEGA 2560

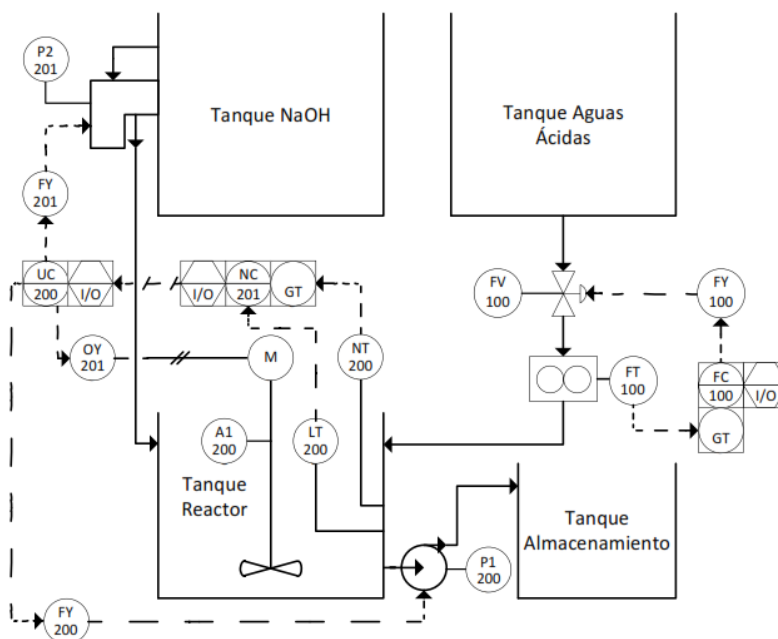


Figura 4.16 Diagrama prototipo implementado.

4.4 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El prototipo diseñado se basa en cuatro tanques independientes, cada uno de ellos cumple una función diferente como se mencionó anteriormente. El funcionamiento del prototipo tiene tres procesos distintos, uno de ellos consiste en el paso del efluente minero líquido hasta el tanque reactor, el segundo proceso tiene como fin agregar el agente neutralizante en el tanque reactor para así poder realizar la neutralización de la acidez existente en los efluentes mineros líquidos y el tercer proceso cumple con drenar las aguas neutralizadas hasta el tanque de almacenamiento. Para controlar los pasos del funcionamiento del prototipo se utilizan tres pines de control (ver Tabla 4.19), estos pines conectan las tarjetas Arduino Uno y Arduino MEGA 2560 teniendo en cuenta que estas señales digitales proceden de la Tarjeta Arduino UNO que es controlada desde Matlab[®]. El código implementado en la tarjeta Arduino MEGA 2560 se observa en el Apéndice A.

Tabla 4.19 Estados lógicos de los procesos para el funcionamiento del prototipo.

<i>Proceso</i>	<i>Pin_Hab</i>	<i>Pin_Hab2</i>	<i>Pin_Hab3</i>
Sistema Detenido	0	0	0
Llenado de Tanque Reactor	1	0	0
Sistema Pausado	0	0	1
Neutralización de aguas ácidas	0	1	0
Drenaje de aguas tratadas	1	1	0

4.4.1 Proceso de Llenado Tanque Reactor

El tanque reactor involucra el sensor de flujo (FT-100), la electroválvula (FV-100) y la tarjeta Arduino MEGA 2560 (FC-100), (ver Figura 4.16). En el momento de activación de este proceso (ver Figura 4.17a) la electroválvula se activa para permitir el paso de las aguas ácidas con el fin de llenar el tanque reactor con este líquido, la cantidad de líquido que llega al tanque reactor siempre debe ser constante, en este caso es de 1 litro, para medir este caudal se implementa un sensor de flujo y un sensor de nivel con los cuales se controla la cantidad de agua ácida que accede al tanque reactor, la señal de este sensor es adquirida por la tarjeta Arduino MEGA 2560 y Arduino UNO respectivamente. La conexión de pines de entrada y salida en este proceso se ilustra en la Figura 4.17b, el código implementado se muestra en el Apéndice A y B. El diagrama de flujo de este proceso se puede apreciar en la Figura 4.20a.

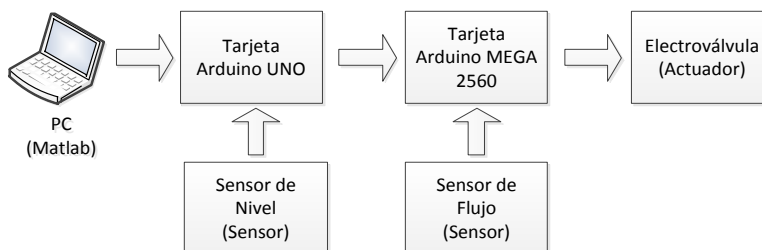


Figura 4.17a Diagrama proceso de llenado tanque reactor.

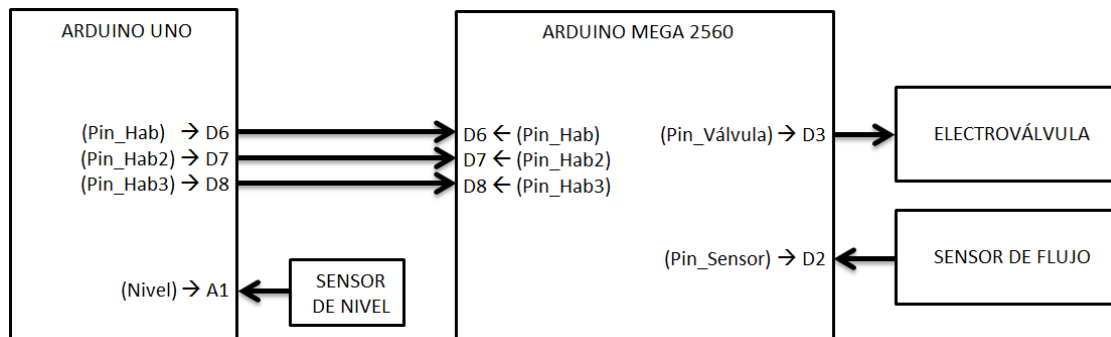


Figura 4.17b Conexión de pines I/O del proceso de llenado tanque reactor

4.4.2 Proceso de Neutralización Aguas Ácidas

Para realizar este procedimiento se cuenta con el tanque NaOH (ver Figura 4.16), el tanque reactor, el sensor de pH (NT-200), el módulo L298N (FY-201), la bomba peristáltica (P2-201), el agitador (A1-200) y las tarjetas Arduino UNO (NC-201) y MEGA2560 (UC-200). Cuando este procedimiento entra en marcha (ver Figura 4.18a) la tarjeta Arduino UNO procesa la señal proveniente del sensor de pH y envía los datos al controlador, luego la señal de control es procesada por la tarjeta Arduino MEGA2560. Posteriormente la tarjeta Arduino convierte estos datos en una señal PWM que es ingresada al módulo L298N, el cual funciona como interfaz de potencia, para regular la velocidad del motor de la bomba peristáltica con el objetivo de controlar la cantidad de soda cáustica (NaOH) agregada al tanque reactor. De este modo se logra la neutralización de las aguas ácidas en el tanque reactor. El agitador se encuentra activo en todo momento de la neutralización para así lograr una homogeneidad en la mezcla de los líquidos involucrados en el tanque reactor. La conexión de pines de entrada y salida en este proceso se detalla en la Figura 4.18b y el diagrama de flujo se ilustra en la Figura 4.20b.

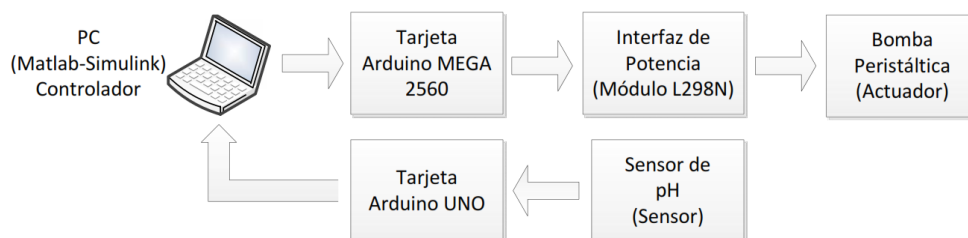


Figura 4.18a Diagrama proceso de neutralización aguas ácidas.

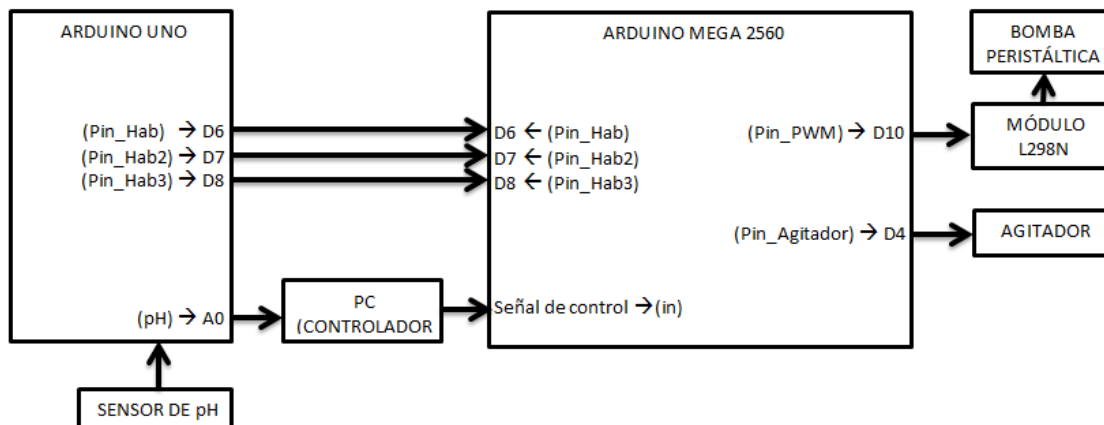


Figura 4.18b Conexión de pines I/O del proceso de neutralización de aguas ácidas.

4.4.3 Proceso de Drenaje Aguas Tratadas

Este es el último paso en el proceso de neutralización de los efluentes mineros líquidos, en este se activa la electrobomba sumergible (P1-200), (ver Figura 4.16) que drenará el agua tratada hasta el tanque almacenamiento y de esta forma permitir el ingreso de nuevos líquidos ácidos para ser tratados (ver Figura 4.19a). La conexión de pines de entrada y salida presentes en este proceso se observa en la Figura 4.19b y en la Figura 4.20c se ilustra el diagrama de flujo.

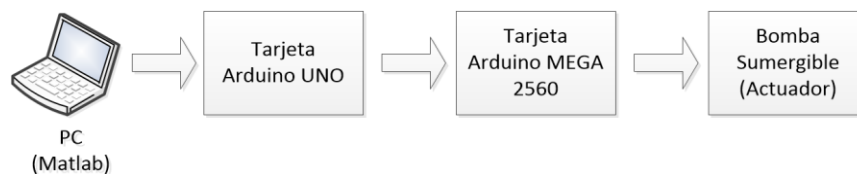


Figura 4.19a Diagrama proceso de drenaje aguas tratadas.

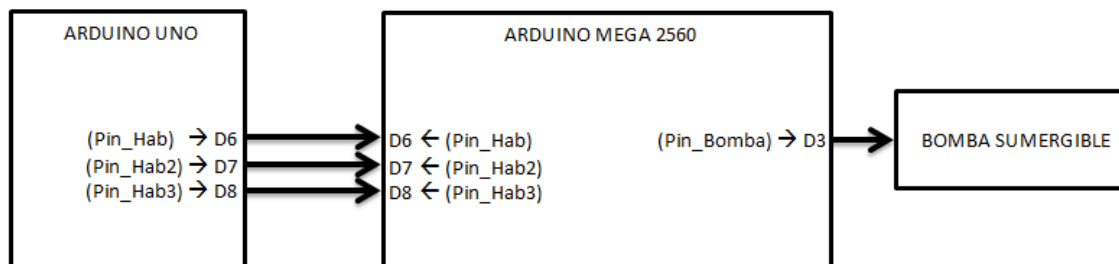


Figura 4.19b Conexión de pines I/O del proceso drenaje aguas tratadas.

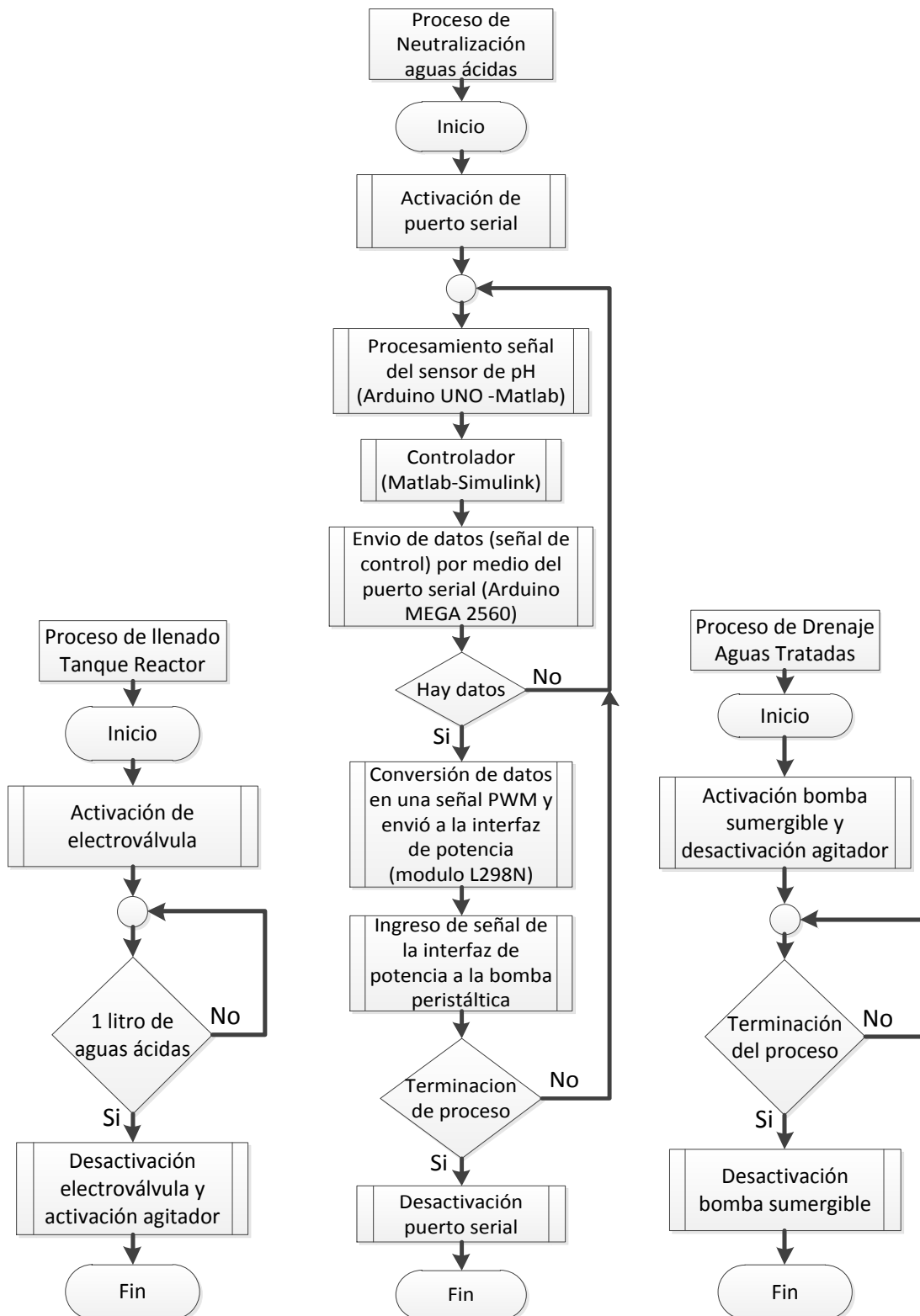


Figura 4.20a Diagrama de flujo llenado tanque reactor.

Figura 4.20b Diagrama de flujo neutralización aguas ácidas.

Figura 4.20c Diagrama de flujo drenaje aguas tratadas.

Capítulo 5 MODELADO DEL SISTEMA

5.1 MODELO DEL SISTEMA

Para realizar el modelado del sistema se considera una sustancia que fluye por una tubería con un retardo determinado y tiene como finalidad llegar al tanque reactor con una mezcla perfecta como se aprecia en la Figura 5.1 (ver más en [60] y [61]).

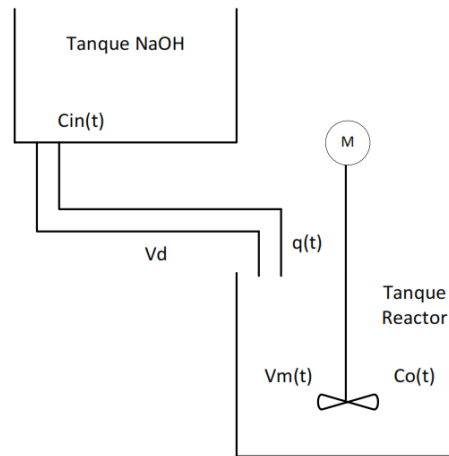


Figura 5.1 Esquema del sistema de concentración.

A partir de la Figura 5.1 se encuentra la ecuación (5.1) describe el proceso:

$$V_m(t) \dot{C}_o(t) = q(t)[C_{in}(t - \theta) - C_o(t)] \quad (5.1)$$

$$\theta(t) = \frac{V_d}{q(t)}$$

Dónde:

$C_o(t)$ Es la concentración en el tanque de salida, $C_{in}(t)$ es la concentración en el tanque de mezcla en la entrada, $V_m(t)$ es el volumen de la sustancia en el tanque en litros [L], $q(t)$ es el flujo de entrada al tanque [L/s], V_d es el volumen en la tubería [m³] y $\theta(t)$ es el retardo de la sustancia (NaOH) en llegar al tanque reactor.

Ordenando las ecuaciones se obtiene la expresión (5.2)

$$\dot{C}_o(t) = -\frac{q(t)}{V_m(t)} C_o(t) + \frac{q(t)}{V_m(t)} C_{in}(t - \theta) \quad (5.2)$$

Suponiendo $V_m(t) = V_{m_0}$ la ecuación queda expresada por (5.3)

$$\dot{C}_o(t) = \frac{q_0}{V_{m_0}} C_o(t) + \frac{q_0}{V_{m_0}} C_{in}(t - \theta) \quad (5.3)$$

Asumiendo para la aplicación $\theta = V_d / q$ y $q(t) = q_0$ constantes

Aplicando la transformada de Laplace se puede obtener la función de transferencia del proceso dada por (5.4).

$$\frac{C_0(s)}{C_{in}(s)} = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau_p s + 1} ; K_p = 1 ; \tau_p = V_{m_0} / q_0 \quad (5.4)$$

Considerando los parámetros determinados en la construcción del prototipo se asume que $Vm(t)$ tiene un valor de 1[L], $q(t)$ con una medida de 6 [ml/s] y $\theta(t)$ con un retardo de 10[s] se obtiene la ecuación del modelo representada por (5.5).

$$G_p(s) = \frac{1e^{-10s}}{166.67s+1} \quad (5.5)$$

5.2 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para llevar a cabo la validación del modelo de diseño se utiliza el método de Ziegler y Nichols, donde es necesario obtener una curva de respuesta del sistema aplicando un escalón a la señal de entrada a la bomba peristáltica.

El primer paso consiste en esperar a que el sensor se estabilice en el valor de pH medido, luego se aplica el escalón al 20% de la señal de entrada a la bomba peristáltica hasta que se llegue al valor de referencia en este caso hasta una escala de pH igual a 7. En este caso el valor de pH igual a 7 comprende un voltaje de 2V. En la Figura 5.2 y 5.3 se pueden observar tanto el esquema utilizado en Matlab® – Simulink® y como el resultado de la curva de respuesta en el sistema. En el Apéndice C se muestra el código implementado en Matlab® para obtener la curva de respuesta.

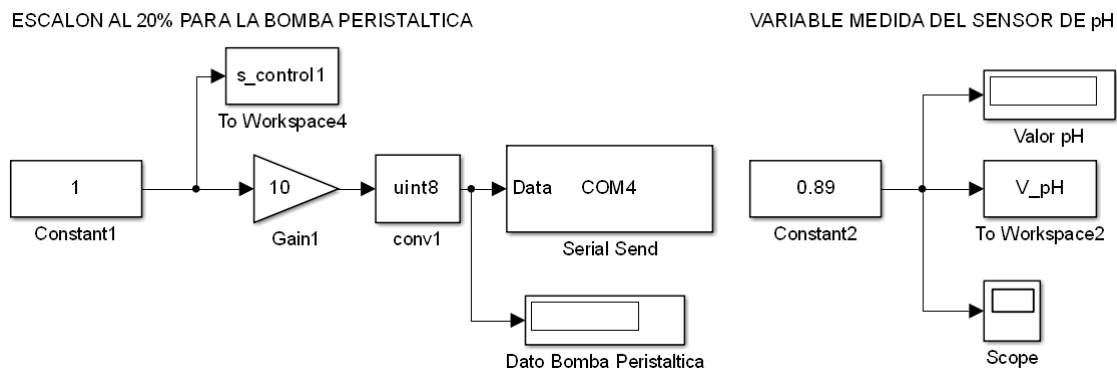


Figura 5.2 Esquema implementado en Matlab®-Simulink® para curva de respuesta.

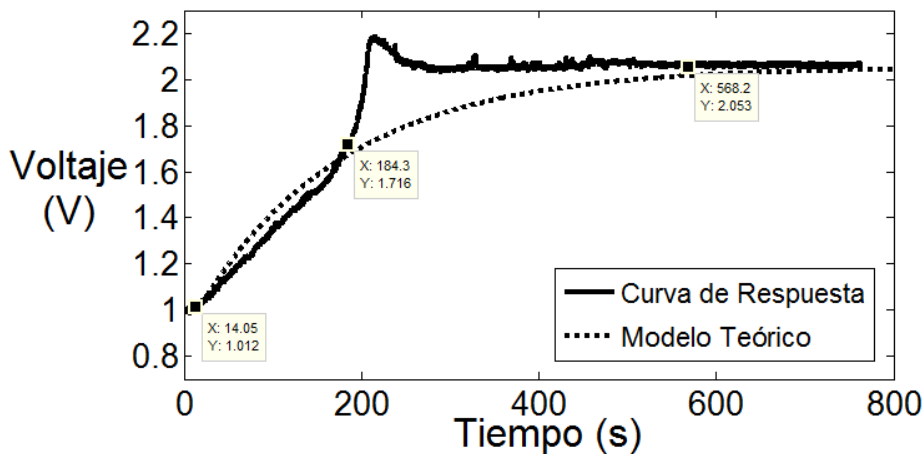


Figura 5.3 Curva de respuesta del sistema y curva del modelo teórico

En la curva de respuesta dada por la Figura 5.3 se puede observar un sobrepico antes de que la señal se estabilice. Esta respuesta es similar a un sistema de segundo orden pero este sobrepico está dado por las medidas que adquiere el sensor de pH mientras se estabiliza la reacción en el tanque reactor. Si la reacción entre las aguas ácidas con la soda cáustica fuera ideal no se presentaría este sobrepico, pero se debe tener en cuenta que se necesita un tiempo mientras el agitador homogeneiza la reacción entre estas sustancias; por esa razón el sensor toma estos datos antes de estabilizarse el sistema.

Con los datos adquiridos de la curva de respuesta (ver Figura 5.2) y al observar los resultados obtenidos por parte de [62], [63], [64], [65] y [66] al encontrar la función de transferencia, se procede a obtenerla conociendo que el prototipo corresponde a un sistema de primer orden con tiempo muerto. Se utiliza la ecuación (3.1) para hallar los parámetros.

$$K_0 = \frac{2.053 - 1.002}{1 - 0} = 1.051 \quad (5.6)$$

$$\tau_0 = 14.05 \quad (5.7)$$

$$\gamma_0 = 184.3 - 14.05 = 170.25 \quad (5.8)$$

Con los parámetros encontrados se obtiene la función de transferencia del sistema de la forma de (3.2) representada por (5.9).

$$G_p(s) = \frac{1.051 e^{-14.05 s}}{170.25 s + 1} \quad (5.9)$$

Al comparar las ecuaciones (5.5) la cual representa la ecuación del modelo teórico con la ecuación (5.9) que representa el modelo experimental, se puede observar que los parámetros no varían mucho entre sí por lo tanto se escoge la ecuación (5.9) para calcular los parámetros de los controladores. Para mayor información acerca del comportamiento de este modelo ver [67].

Capítulo 6 DISEÑO DE CONTROLADORES

Uno de los problemas en el prototipo para el control del nivel de acidez en los efluentes mineros líquidos es la poca concentración de acidez en estas aguas, por lo tanto el control se hace riguroso. Para solucionar este problema se necesita agregar a la solución 50 mililitros de zumo de limón por cada litro de agua acida a tratar, con el fin de tener una mejor concentración de acidez en el agua y así lograr un mejor control en la neutralización de dichas aguas.

6.1 CONTROLADOR

Para el diseño del controlador se debe tener en cuenta que la variable de entrada es el agente neutralizante (NaOH) en el tanque reactor donde se lleva a cabo la neutralización de las aguas ácidas. Como salida del sistema se tiene el voltaje del sensor de pH, que se encuentra en el tanque reactor, con el cual se mide el nivel de acidez (pH) en los efluentes a tratar. Para situar el sensor de pH en el tanque reactor se escogió una posición óptima donde la mezcla de las aguas ácidas con al agente neutralizante no altere las medidas del sensor. Un factor clave en la posición del sensor es la distancia con respecto al agitador, porque al estar muy cerca al agitador la medida del nivel de acidez por parte del sensor de pH es muy inestable.

Las estrategias de control utilizadas en el sistema son, sintonización de PID, métodos algebraicos, lógica difusa y modos deslizantes, con los cuales se pretende realizar una comparación en la respuesta de cada tipo de controlador implementado. El código implementado se encuentra en el Apéndice C.

6.2 CONTROLADOR PI

Para llevar a cabo el diseño de este controlador se utiliza el método de sintonización en lazo abierto de Ziegler y Nichols, donde es necesaria la curva de respuesta ilustrada en la Figura 5.3

A partir de (5.9) se decide escoger un controlador PI debido a la respuesta que tiene el sistema, basándose en la Tabla 3.1 y 3.2 se implementan diferentes controladores implementando el criterio de la integral del cuadrado del error (ICE) y el criterio de la integral del valor absoluto ponderado en el tiempo (ITAE).

Los valores hallados de los parámetros para los controladores son: Para el controlador por sintonización experimental $K_p = 10.3765$; $T_i = 42.15$, la ecuación diofántica para este criterio está dada por (6.1).

$$u(t) = 10.3765 \left[e(t) + \frac{1}{42.15} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau \right] \quad (6.1)$$

Con criterio (ICE) los parámetros son $K_p = 13.5831$; $T_i = 54.7623$, la ecuación (6.2) representa la ecuación diofántica para el criterio (ICE).

$$u(t) = 13.5831 \left[e(t) + \frac{1}{54.7623} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau \right] \quad (6.2)$$

Finalmente los parámetros del controlador mediante el criterio (ITAE) están dados por $K_p = 9.3515$; $T_i = 46.3135$, la ecuación diofántica para el criterio (ITAE) se puede observar en (6.3).

$$u(t) = 9.3515 \left[e(t) + \frac{1}{46.3135} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau \right] \quad (6.3)$$

6.2.1 Implementación Controlador PI

En la Figura 6.1a se observa el esquema del controlador PI implementado en Matlab® – Simulink® y en la Figura 6.1b la configuración del controlador PI.

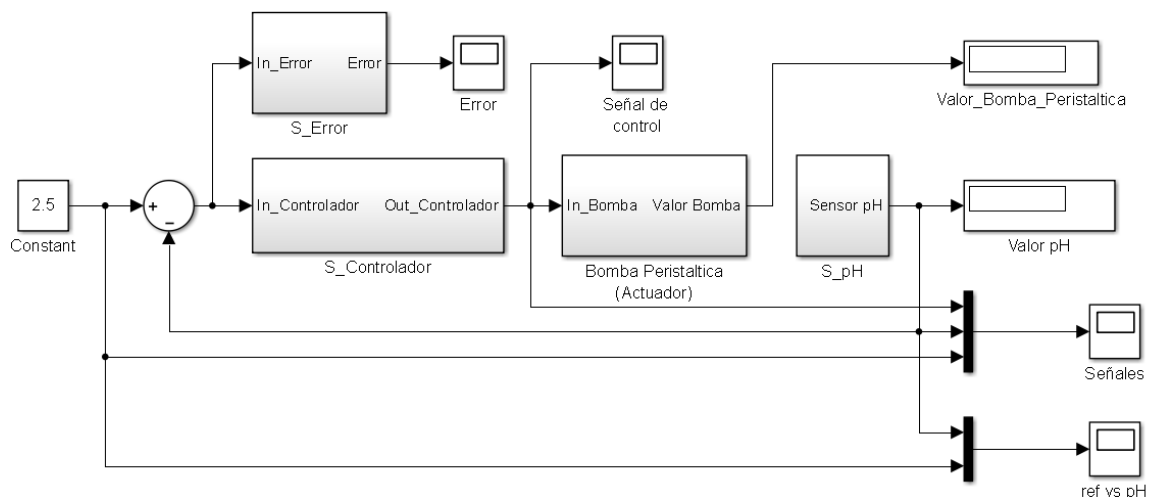


Figura 6.1a Controlador PI implementado en Matlab® – Simulink®.

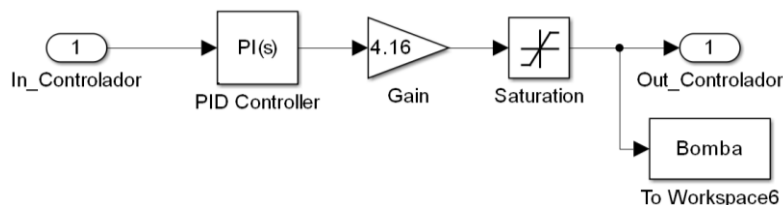


Figura 6.1b Configuración controlador PI en Matlab® – Simulink®.

6.2.2 Resultados Controlador PI

En la Figura 6.2 se observa la comparación de los controladores PI implementando diferentes criterios de mínima integral del error con el propósito de escoger el criterio con mejor desempeño en términos de tiempo de respuesta, tiempo de establecimiento y error con respecto a la referencia.

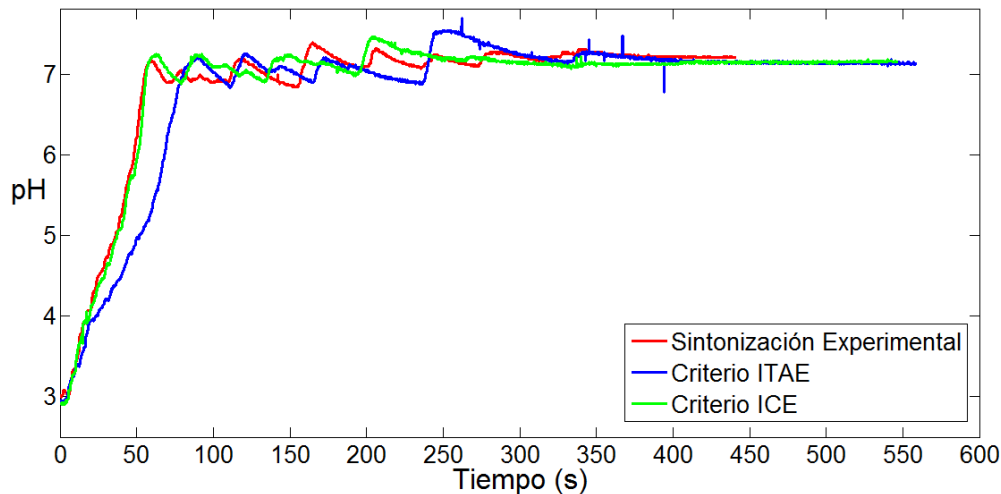


Figura 6.2 Comparación criterios implementados en el controlador PI.

Tabla 6.1 Resultados de los criterios implementados en el controlador PI.

<i>Criterio</i>	<i>Tiempo de Respuesta (s)</i>	<i>Máximo Sobrepico (%)</i>	<i>Tiempo de Establecimiento (s)</i>	<i>Error (%)</i>
Sintonización Experimental	55.5	5.57	350 – 400	3.12
ITAE	80.5	7.77	350 – 400	1.66
ICE	56.5	6.54	300 - 350	1.66

Teniendo en cuenta los resultados del controlador PI con los criterios implementados (ver Tabla 6.1) se observa que el criterio usado en el controlador con el tiempo de respuesta más rápido es el criterio por sintonización experimental con 55.5 segundos mientras que el más lento en responder es el criterio de la integral del valor absoluto ponderado en el tiempo (ITAE) con 80.5 segundos. El criterio implementado en el controlador PI que posee el sobrepico más alto es el criterio ITAE con un valor del 7.77% y el criterio con el sobrepico más bajo es el criterio por sintonización experimental con 5.57%. En términos del tiempo de establecimiento el criterio ICE usado en el controlador PI es el más rápido con un tiempo entre los 300 y 350; los demás criterios poseen un tiempo similar entre los 350 y 400 segundos. Al observar el error entre los criterios implementados en el controlador PI, teniendo en cuenta que la referencia es un

pH de 7, los criterios ICE y ITAE poseen el error más bajo con un valor del 1.66% mientras que el criterio por sintonización experimental tiene un error del 3.12%.

El criterio implementado en el controlador PI con mejor desempeño en términos de tiempo de respuesta, tiempo de establecimiento y error con respecto a la referencia es el criterio del cuadrado del error (ICE) por lo tanto se usa este criterio en el controlador PI. El objetivo del controlador diseñado es mejorar el tiempo de respuesta del sistema y el error en estado estacionario. Para ello se ilustran la señal de control aplicada al sistema (Figura 6.3), la respuesta del sistema al controlador (Figura 6.4) y el error del sistema (Figura 6.5).

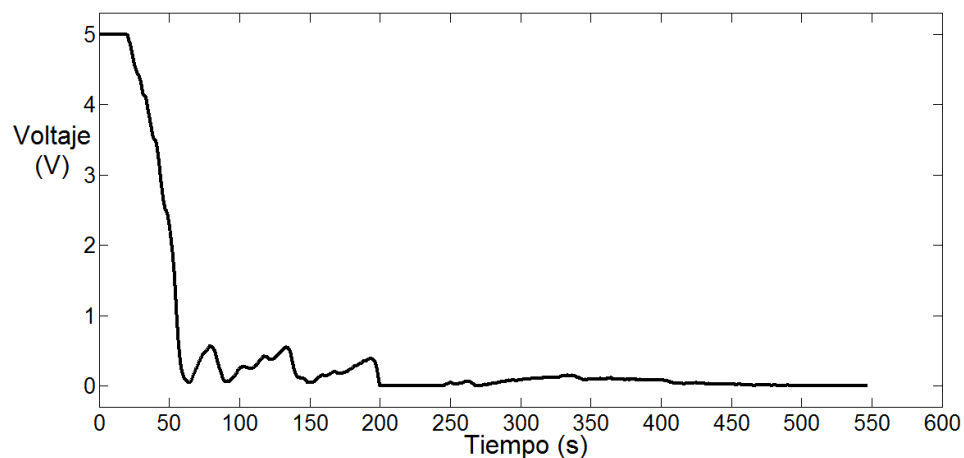


Figura 6.3 Señal de control aplicada al sistema controlador PI.

Al observar la Figura 6.3, se nota que la señal de control generada por el controlador PI tiene un rango entre 0 y 5 voltios con un tiempo de 64.5 segundos en llegar a ser 0 voltios, posee un valor máximo de 5 voltios durante 20.56 segundos y tiene que actuar cuatro veces en el prototipo antes de que el sistema se estabilice.

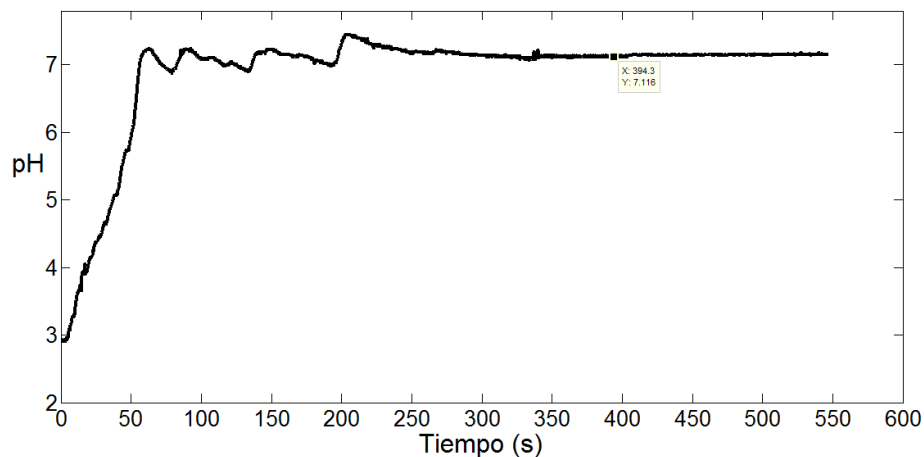


Figura 6.4 Respuesta del sistema al controlador PI.

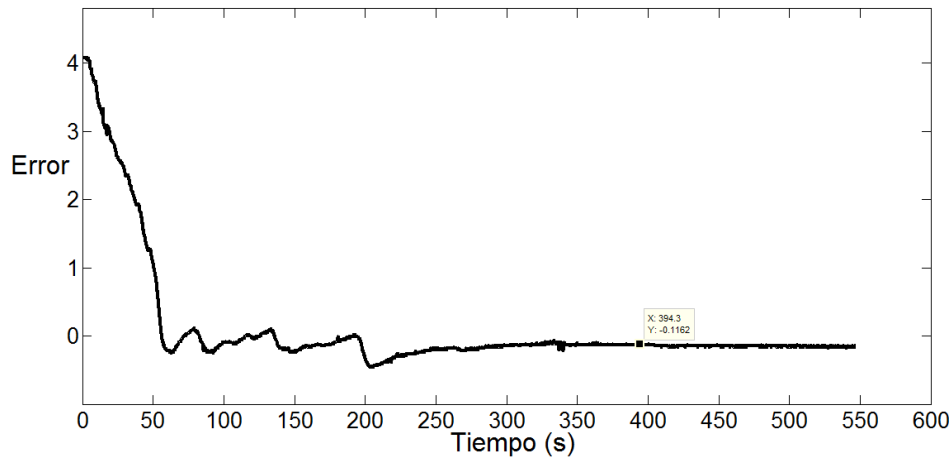


Figura 6.5 Error del sistema al controlador PI.

Las Figuras 6.4 y 6.5 ilustran el comportamiento del sistema a la señal de control implementada, así como el error antes del estado estacionario. El tiempo de respuesta al implementar el controlador PI en el sistema es de 56.5 segundos, posee un tiempo de establecimiento entre los 300 y 350 segundos, en este intervalo de tiempo el sistema presenta cuatro sobrepicos. Este controlador tiene un error del 1.66% y un sobrepico máximo del 6.54% con respecto a la referencia la cual es un pH de 7.

6.3 CONTROLADOR POR MÉTODO ALGEBRAICO

Con la función de transferencia del comportamiento del sistema en lazo abierto, se considera diseñar un controlador algebraico para el modelo lineal del reactor.

Los parámetros obtenidos por medio de la curva de reacción del sistema en lazo abierto proveen los datos suficientes para establecer el modelo de referencia como se debe comportar el sistema en lazo cerrado. Los parámetros provenientes de la función de transferencia (5.9) son: $K_0 = 1.051$; $\tau_0 = 14.05$; $\gamma_0 = 170.25$

Dado que la función de transferencia del prototipo presenta un retardo de transporte el cual hace que la función de transferencia no sea racional, es conveniente realizar una discretización del modelo suponiendo la entrada generada por medio de un retenedor de orden cero. (Para más detalles al respecto véase [68])

Con los parámetros del sistema ya definidos se establece un periodo de muestreo de 2 segundos que corresponde al 10% del retardo de transporte y al 0.1% de la constante de tiempo. El periodo de muestreo es prioritario en el momento de discretizar el modelo de tiempo continuo y así calcular los parámetros del controlador, es decir los parámetros de los polinomios *Acd*, *Dcd*, *Nrd* y *Nfd* en el esquema general del controlador algebraico (ver Figura 6.6). En el Apéndice D se muestra el código implementado en Matlab para poder calcular los parámetros de los polinomios implementados así como el código implementado para visualizar la señal del sensor de pH (ver Apéndice A)

6.3.1 Implementación Controlador Algebraico

En la Figura 6.6 se ilustra el esquema del controlador algebraico implementado en Matlab® – Simulink®.

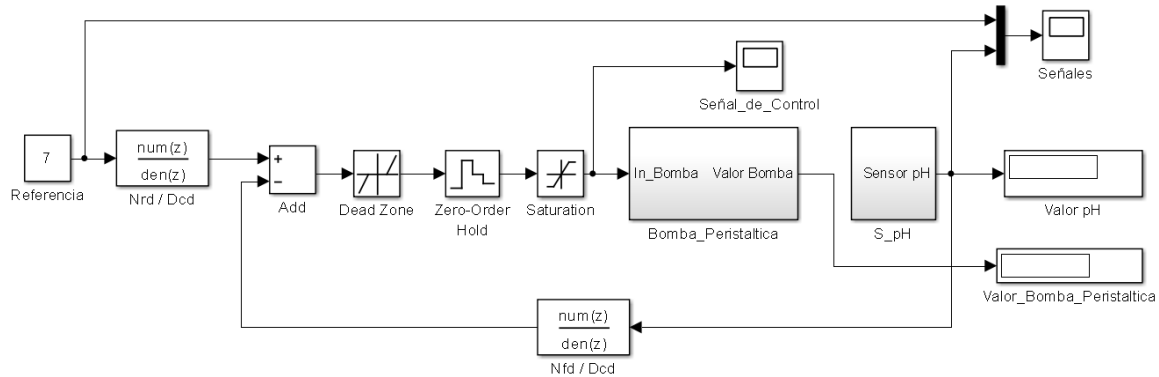


Figura 6.6 Esquema controlador algebraico implementado en Matlab® – Simulink®.

La función de transferencia discreta $\frac{Nrd(z)}{Dcd(z)}$ está definida por (6.4)

$$\frac{Nrd(z)}{Dcd(z)} = \frac{81.47 z^7}{z^7 + 0.9883 z^6 + 0.9768 z^5 + 0.9654 z^4 + 0.9541 z^3 + 0.943 z^2 + 0.9319 z + 0.9211} \quad (6.4)$$

Mientras la función de transferencia discreta $\frac{Nfd(z)}{Dcd(z)}$ está definida en (6.5)

$$\frac{Nfd(z)}{Dcd(z)} = \frac{74.16 z^7}{z^7 + 0.9883 z^6 + 0.9768 z^5 + 0.9654 z^4 + 0.9541 z^3 + 0.943 z^2 + 0.9319 z + 0.9211} \quad (6.5)$$

6.3.2 Resultados Controlador Algebraico

El objetivo del controlador es mejorar el tiempo de respuesta y el error de seguimiento del sistema en lazo cerrado por esa razón se muestran la señal de control aplicada al sistema (Figura 6.7), la respuesta del sistema al controlador (Figura 6.8) y el error del sistema (Figura 6.9).

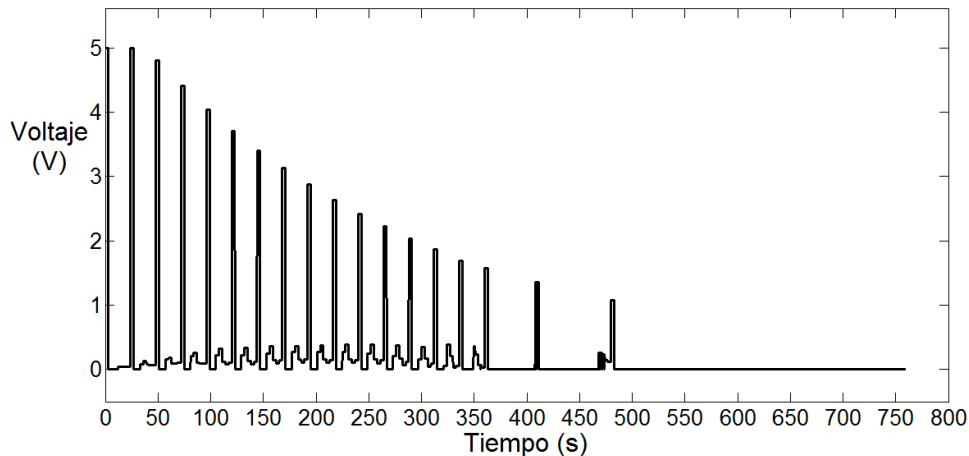


Figura 6.7 Señal de control aplicada al sistema controlador algebraico.

La Figura 6.7 ilustra el comportamiento de la señal de control generada por el controlador algebraico; tiene un rango de entre 0 y 5 voltios en un intervalo de tiempo de 363 segundos, posee una magnitud de 5 voltios durante 2.9 segundos y en total se generan 19 pulsos antes de que el sistema se estabilice. Los pulsos están asociados con el periodo de muestreo, si este periodo es muy bajo la señal de control genera pulsos en los cuales la bomba peristáltica no puede responder. Al contrario si el periodo de muestreo es demasiado alto los pulsos adquieren un tiempo más largo en responder lo cual hace que el sistema tenga un mal desempeño.

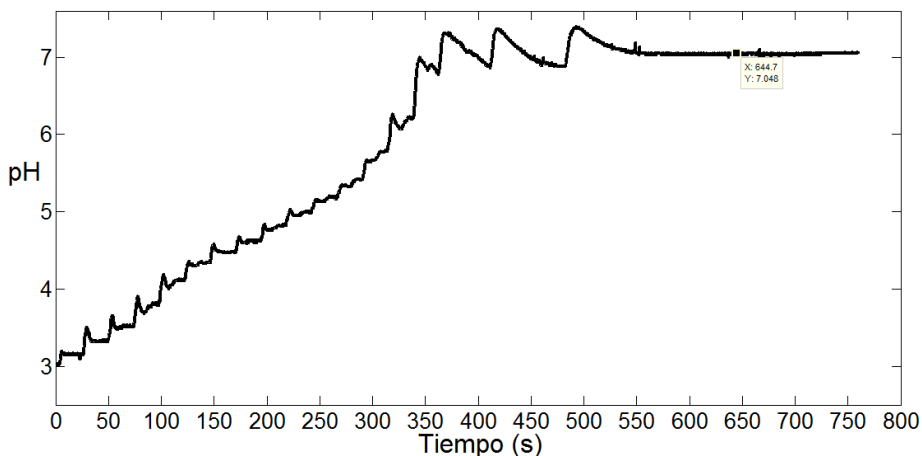


Figura 6.8 Respuesta del sistema al controlador algebraico.

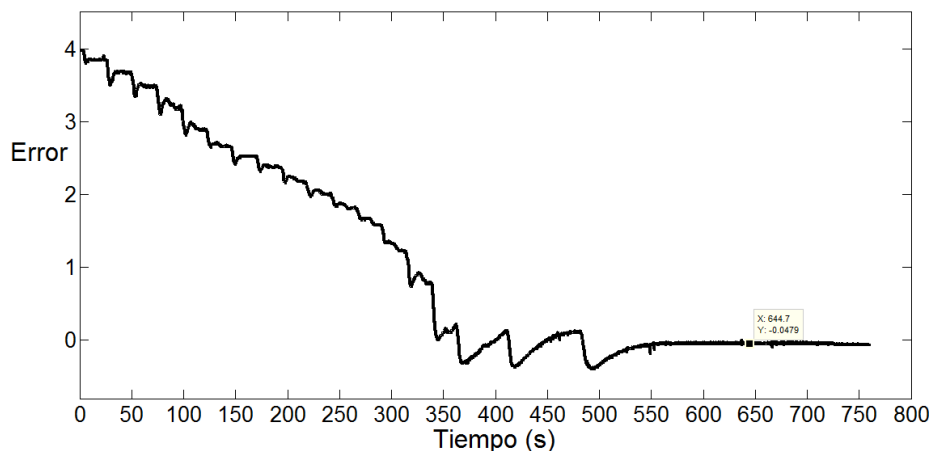


Figura 6.9 Error del sistema al controlador algebraico.

En las figuras 6.8 y 6.9 se puede apreciar la respuesta del sistema a la señal de control implementada así como el error durante la fase transitoria. El tiempo de respuesta al implementar el controlador algebraico en el sistema es de 345.3 segundos, tiene un tiempo de establecimiento entre los 550 y 600 segundos, en este intervalo de tiempo el sistema presenta seis sobrepicos. Este controlador posee un error del 0.69% y un sobrepico máximo del 5.57% con respecto a la referencia la cual es un pH de 7.

6.4 CONTROL MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

Conociendo el comportamiento del sistema en lazo abierto se considera diseñar un controlador por lógica difusa (ver Figura 6.10), utilizando como editor de este tipo de controlador FIS editor en Matlab[®]. Se utiliza la inferencia Mamdani con funciones de pertenencia trapezoidal y triangular. Para las operaciones entre los subconjuntos se utiliza el conector AND.

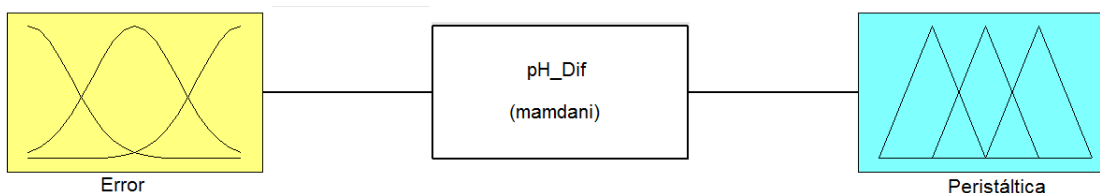


Figura 6.10 Diagrama de bloques controlador mediante lógica difusa.

Para definir el universo de discurso, los conjuntos difusos y las reglas de base del controlador se considera la siguiente notación: **Alt**: Alto; **Med**: Medio; **Baj**: Bajo; **Cero**: Cero; **TCerrada**: Totalmente cerrada; **1Q**: 25% de la bomba; **2Q**: 50% de la bomba; **TAbierta**: Totalmente abierta

La Tabla 6.2 se detalla las características de las reglas establecidas para el controlador.

Tabla 6.2 Reglas controlador lógica difusa.

<i>Especificación</i>	<i>Medida</i>
Alt	TAbierta
Med	50%
Baj	25%
Cero	TCerrada

Se plantea un conjunto para la entrada del sistema denominado “Error” el cual contiene cuatro subconjuntos llamados $\{Alt, Med, Baj, Cero\}$. El universo discurso de este conjunto está comprendido entre $[-9, 9]$ dado que son los errores máximos que pueden existir en las medidas de pH del prototipo. Los límites para los conjuntos se toman teniendo en cuenta el rango que pueda presentar el error; por esta razón se asume un error alto cuando se encuentra a 3 unidades de pH o más de la referencia y un error bajo a 1 unidad de pH de la referencia. En este caso se emplearon funciones trapezoidales y triangulares como se aprecia en la Figura 6.11.

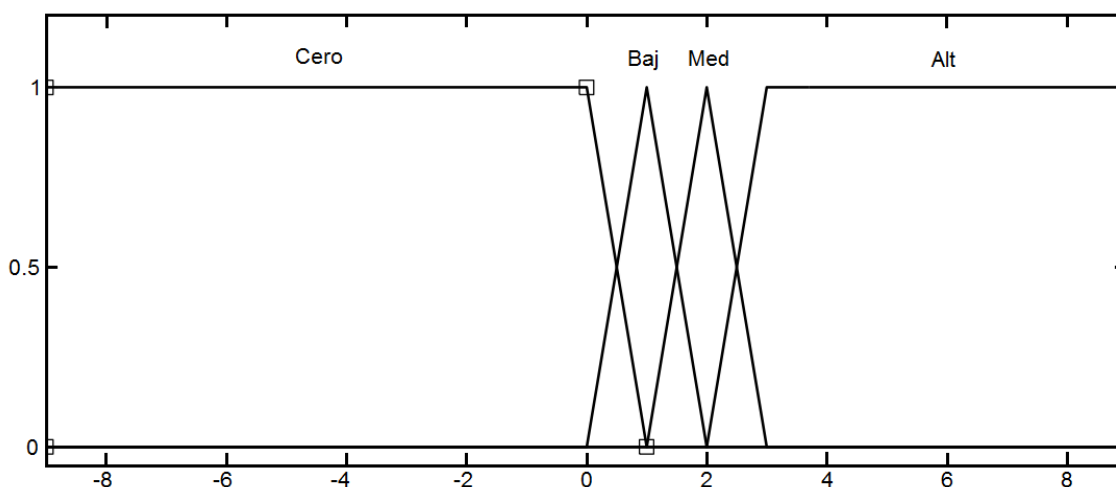


Figura 6.11 Subconjuntos pertenecientes al conjunto error.

Para la salida del controlador de lógica difusa se emplea un universo de discurso comprendido entre $[0,5]$, para el conjunto de salida denominado “Peristáltica”. Esta elección se realizó con base a que esta variable será ingresada al actuador del prototipo. El conjunto “Peristáltica” está dividido en cuatro subconjuntos nombrados $\{TCerrada, 1Q, 2Q, TAbierta\}$. Con el fin de tener un mayor control al adicionar cantidades pequeñas de soda cáustica (NaOH) cuando el sistema se va acercando al punto de referencia, el rango del subconjunto TCerrada es menor y no es simétrico con los demás subconjuntos. El subconjunto TAbierta posee un rango amplio con el objetivo de agregar la mayor cantidad de soda cáustica (NaOH) antes de llegar a 2.5 unidades de pH de la referencia. En esta ocasión se utilizaron funciones triangulares como se observa en la Figura 6.12

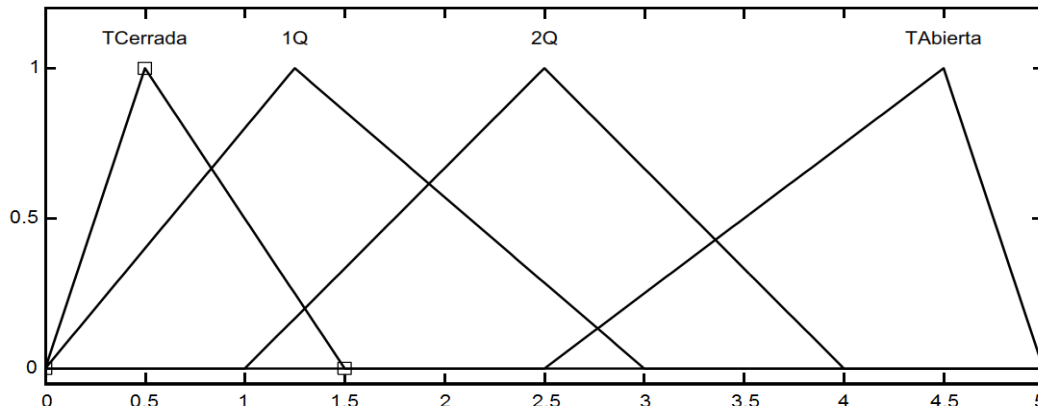


Figura 6.12 Subconjuntos pertenecientes al conjunto peristáltica.

Con las funciones de entrada y salida definidas se establecen las operaciones entre los conjuntos en la que se empleó el AND lógico. Se utiliza este operador lógica con el objetivo de que solo se cumpla una condición de salida para cada condición de entrada. Estas operaciones se muestran en la Figura 6.13

1. If (Error is Cero) then (Peristáltica is TCerrada) (1)
2. If (Error is Bajo) then (Peristáltica is 1Q) (1)
3. If (Error is Medio) then (Peristáltica is 2Q) (1)
4. If (Error is Alto) then (Peristáltica is TAbierta) (1)

Figura 6.13 Operaciones de control para el prototipo.

En la Figura 6.14 se puede apreciar la gráfica generada por el controlador de lógica difusa como función de la señal de entrada en este caso el error.

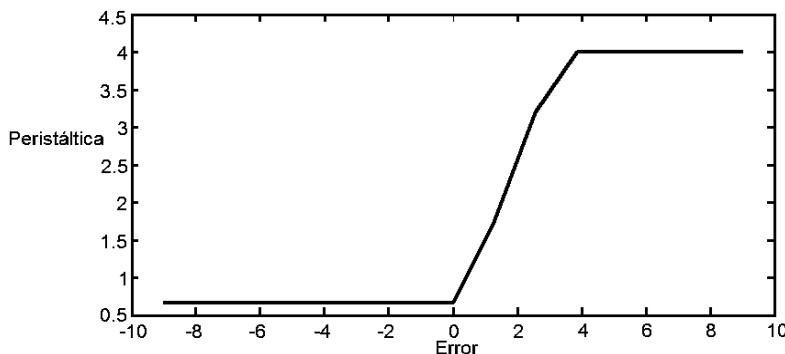


Figura 6.14 Gráfica del controlador de lógica difusa (Peristáltica Vs Error).

6.4.1 Implementación Controlador Lógica Difusa.

En la Figura 6.15a se observa el esquema del controlador mediante lógica difusa implementado en Matlab[®] – Simulink[®] y en la Figura 6.15b la configuración del controlador. En el Apéndice A se muestra el código implementado para este controlador.

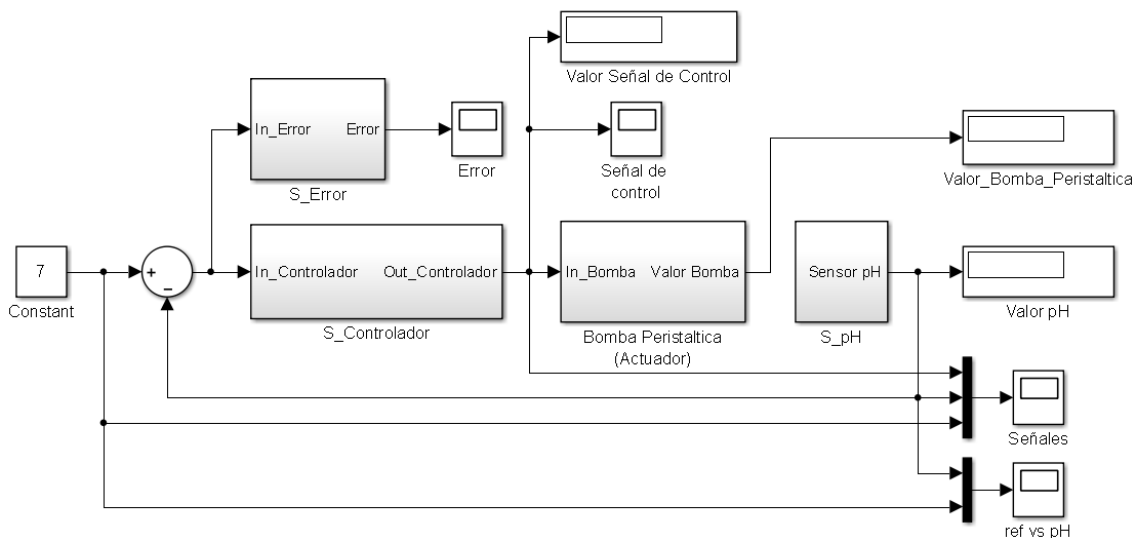


Figura 6.15a Esquema controlador lógica difusa implementado en Matlab® – Simulink® .

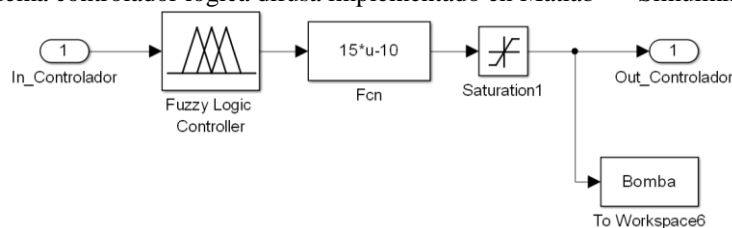


Figura 6.15b Configuración controlador de lógica difusa en Matlab® – Simulink® .

6.4.2 Resultados Controlador Lógica Difusa

El objetivo del controlador diseñado es observar el tiempo de respuesta en el sistema. Para ello se ilustran la señal de control aplicada al sistema (Figura 6.16), la respuesta del sistema al controlador (Figura 6.17) y el error del sistema (Figura 6.18).

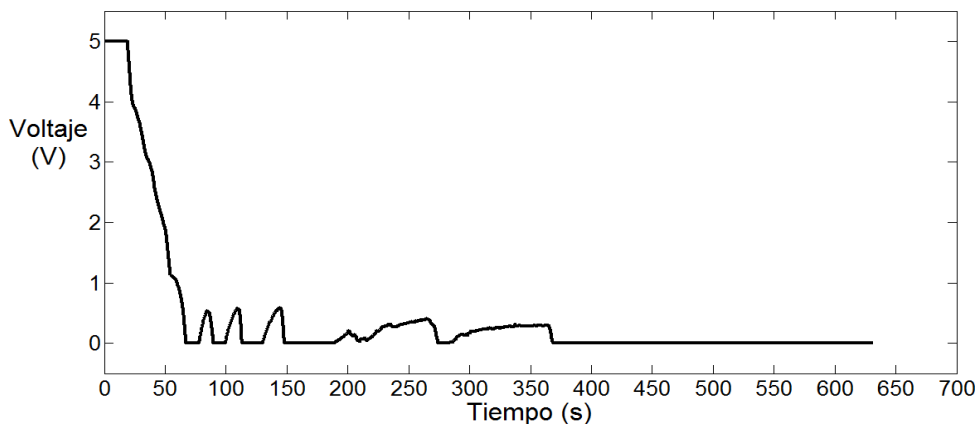


Figura 6.16 Señal de control aplicada al sistema mediante lógica difusa

Al observar la Figura 6.16, la señal de control generada por el controlador mediante lógica difusa tiene un rango entre 0 y 5 voltios en un tiempo de 67.3 segundos antes de llegar a ser 0 voltios, posee una magnitud de 5 voltios durante 19 segundos y tiene que actuar seis veces en el prototipo antes de que el sistema se estabilice.

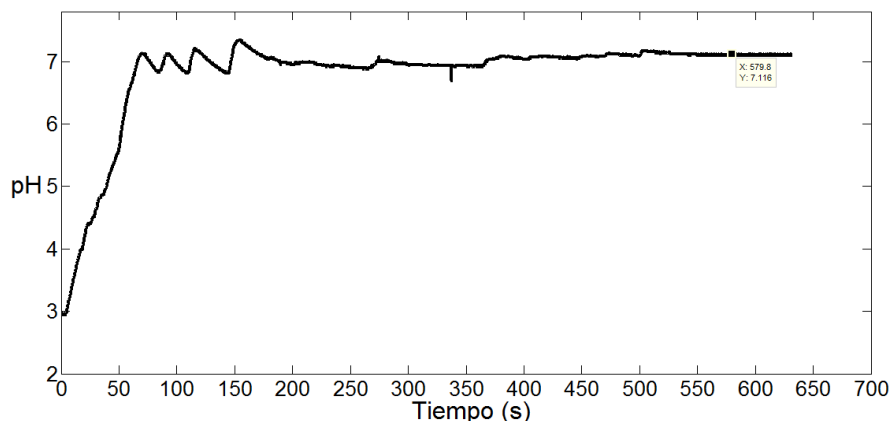


Figura 6.17 Respuesta del sistema al controlador de lógica difusa.

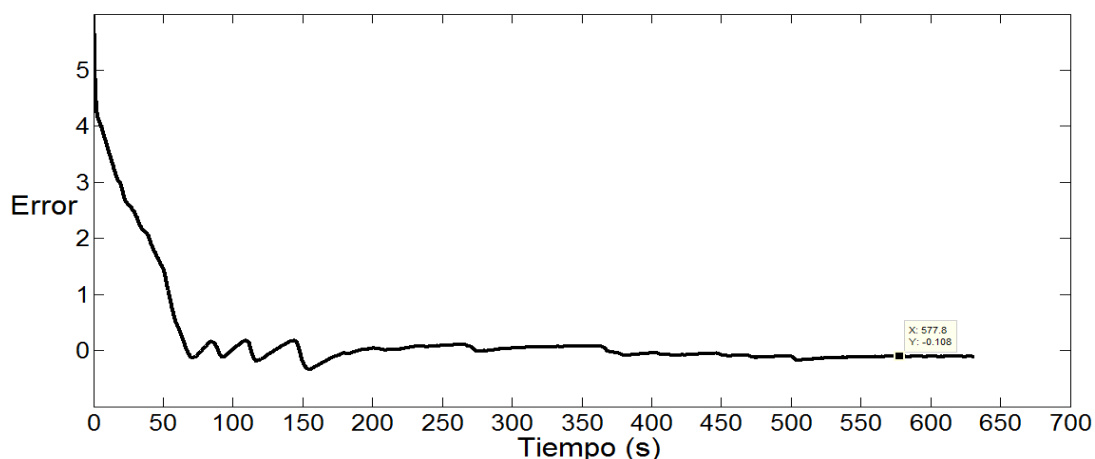


Figura 6.18 Error del sistema al controlador de lógica difusa.

Las figuras 6.17 y 6.18 ilustran el comportamiento del sistema a la señal de control implementada así como el error antes de establecerse el sistema. El tiempo de respuesta al implementar el controlador mediante lógica difusa en el sistema es de 66.2 segundos, posee un tiempo de establecimiento entre los 500 y 550 segundos. En este intervalo de tiempo el sistema presenta cuatro sobrepicos. Este controlador posee un error del 1.66% y un sobrepico máximo del 4.84% con respecto a la referencia la cual es un pH de 7.

6.5.2 Resultados Controlador Modos Deslizantes

El objetivo del controlador diseñado es mejorar el tiempo de respuesta en el sistema y hacerlo más robusto frente a perturbaciones y dinámicas no modeladas. Por esta razón ello se muestran la señal de control aplicada al sistema (Figura 6.20), la respuesta del sistema al controlador (Figura 6.21) y el error del sistema (Figura 6.22).

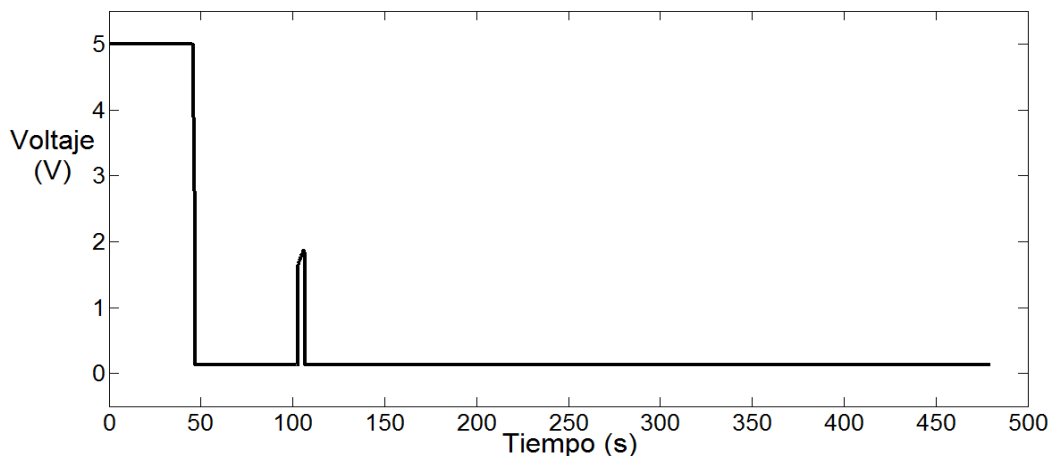


Figura 6.20 Señal de control aplicada al sistema modos deslizantes.

La Figura 6.20 ilustra el comportamiento de la señal de control generada por el controlador por modos deslizantes; tiene un rango entre 0 y 5 voltios en un tiempo de 47 segundos, posee una magnitud de 5 voltios en un tiempo de 45.7 segundos y tiene que actuar 2 veces en el prototipo antes de que la superficie llegue a ser cero.

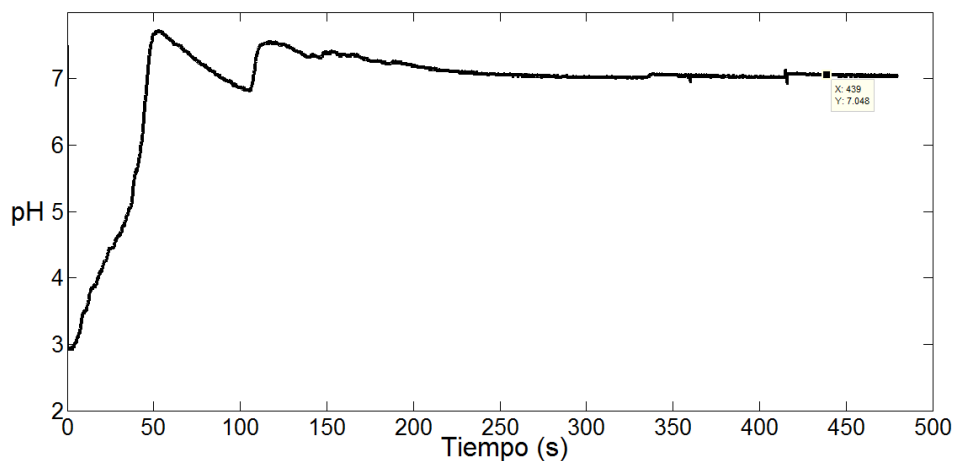


Figura 6.21 Respuesta del sistema al controlador por modos deslizantes.

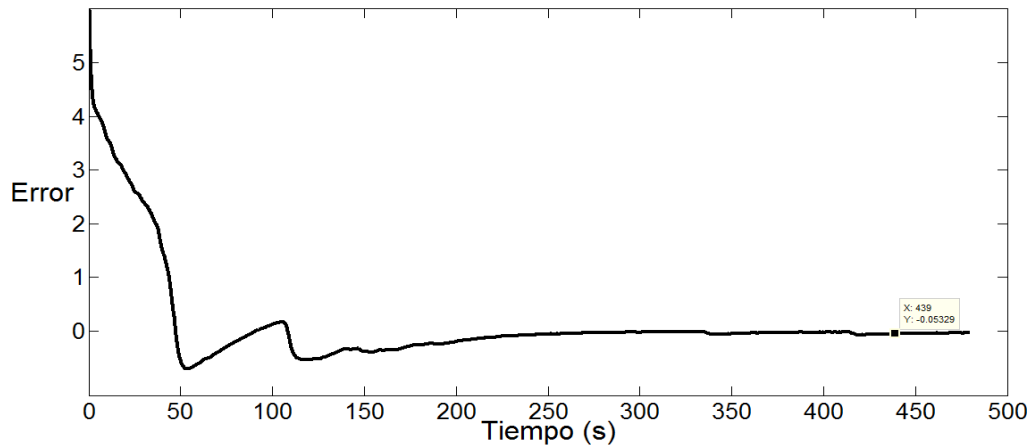


Figura 6.22 Error del sistema al controlador por modos deslizantes.

En las figuras 6.21 y 6.22 se puede apreciar la respuesta del sistema a la señal de control implementada así como el error antes de establecerse el sistema. El tiempo de respuesta al implementar el controlador algebraico en el sistema es de 46.5 segundos, tiene un tiempo de establecimiento entre los 250 y 300 segundos. En este intervalo de tiempo el sistema presenta dos sobrepicos. Este controlador posee un error del 0.69% y un sobrepico máximo del 10% con respecto a la referencia la cual es un pH de 7.

Capítulo 7 RESULTADOS

La comparación entre los diferentes controladores, implementados en el prototipo para la neutralización de los efluentes mineros líquidos provenientes de la mina de carbón del SENA ubicada en Morcá se ilustra en la Figura 7.1. Se debe en cuenta que el sistema posee un retardo promedio de 14.05 segundos. El valor de referencia para llevar a cabo las respuestas de los controladores tiene un valor de pH de 7.

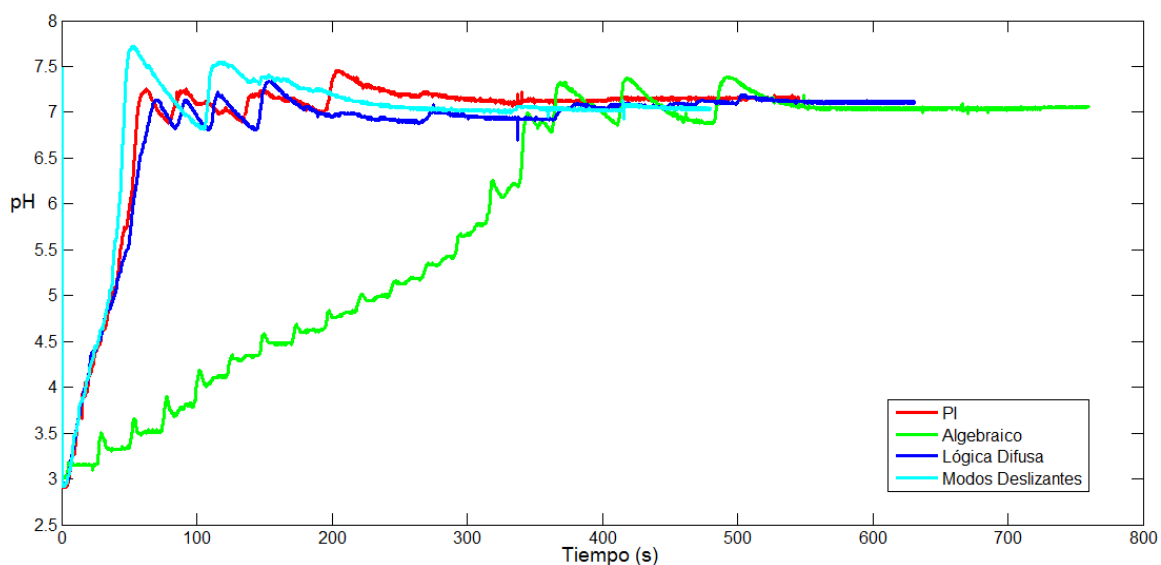


Figura 7.1 Comparación de los controladores implementados en el prototipo.

7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 7.1 se realiza la comparación de las respuestas de los controladores en el sistema así como la comparación en las señales de control. Los datos obtenidos para la comparación de los controladores se pueden observar en las figuras correspondientes a los resultados de cada controlador ilustradas en el capítulo 6.

Tabla 7.1 Comparación controladores.

<i>Controlador</i>	<i>Señal de control</i>	<i>Respuesta del sistema</i>
Controlador PI	El sistema exige una señal de control leve, debido a que va disminuyendo desde los 5V hasta llegar a los 0V en 64.5 s de forma moderada. Tiene un valor máximo de 5V durante 20.56 s y es exigida 4 veces antes de estabilizarse el sistema.	El sistema tiene un tiempo de respuesta de 56.5 s, el tiempo de establecimiento ocurre entre 300 y 350 s, en el transcurso de este tiempo el sistema presenta cuatro sobrepicos, el error en el sistema es de 1.66% y un sobrepico máximo del 6.54%.
Controlador Algebraico	La señal de control es bastante exigida porque tiene cambios bruscos de valores entre 0V y 5V, cada 2.95 s en un intervalo de tiempo de 363 s. Se generan 19 pulsos antes de la estabilización del sistema.	El sistema presenta un tiempo de respuesta de 345.3 s, posee un tiempo de establecimiento entre 550 y 600 s, durante este tiempo el sistema tiene seis sobrepicos. El sobrepico máximo tiene un valor del 5.57% y el error de 0.69% con respecto a la referencia.
Controlador mediante Lógica Difusa	La señal de control exigida es leve, con una reducción de los 5V a los 0V en un tiempo de 67.3 s, posee un tiempo en alto de 5V durante 19 s. Tiene que actuar 6 veces antes de estabilizarse el sistema.	El sistema posee un tiempo de respuesta de 66.2 s, presenta un tiempo de establecimiento entre 500 y 550 segundos, en el transcurso de este tiempo el sistema tiene cuatro sobrepicos, el error en el sistema es de 1.66% y un sobrepico máximo del 4.84% con respecto a la referencia.
Controlador por Modos Deslizantes	La señal de control tiene un rango entre 0V y 5V, interviene durante 47 s antes de llegar a los 0V, posee una magnitud de 5V por 45.7 s y tiene que actuar 2 veces antes de lograr que la superficie llegue a cero.	El sistema tiene un tiempo de respuesta de 46.5 s, el tiempo de estabilización ocurre entre los 250 y 300 segundos, en este intervalo de tiempo el sistema presenta dos sobrepicos con un valor máximo del 10%. El error en el sistema es de 0.69% con respecto a la referencia.

Teniendo en cuenta los datos presentados por los controladores implementados para la neutralización de las aguas ácidas, el controlador que presenta el tiempo de respuesta más lento es el controlador algebraico con un tiempo de 345.3 segundos mientras que el controlador por modos deslizantes es el más rápido con 46.5 segundos. Esto mismo ocurre en el tiempo de estabilización donde el controlador algebraico estabiliza el sistema en un intervalo de 500 y 550 segundos, mientras el controlador por modos deslizantes lo logra en un tiempo entre 250 y 300 segundos. Antes de la estabilización del sistema el controlador algebraico presenta seis sobrepicos mientras que los controladores PI y mediante lógica difusa generan cuatro sobrepicos respectivamente; el controlador por modos deslizantes solo genera dos sobrepicos. Aunque el controlador por modos deslizantes solo posee dos sobrepicos uno de ellos tiene el máximo sobrepico entre los controladores con un valor del 10%; el valor más bajo en el sobrepico máximo lo presenta el controlador por lógica difusa con 4.84%.

Los controladores implementados en el sistema que poseen el error más bajo son los controladores algebraico y por modos deslizantes con una magnitud del 0.69%. Aunque los controladores PI y por lógica difusa tienen un error del 1.66% el resultado no es alto considerando que el valor de referencia del pH igual a 7 se encuentra en una región inestable.

Al observar la señal de control generada por los diferentes controladores, el controlador algebraico genera una señal de control que actúa 19 veces cada 2.95 segundos en un intervalo de tiempo de 363 segundos antes de que el sistema se estabilice, mientras que el controlador por modos deslizantes solo exige a la señal de control que actúe dos veces en un tiempo de 45.7 segundos con un tiempo de exigencia de 5 voltios en un tiempo de 45.7 segundos.

Con los datos provenientes de la Tabla 7.1, el controlador por modos deslizantes es el que presenta un mejor desempeño en términos del tiempo de respuesta, tiempo de establecimiento, magnitud de la señal de control y error en el sistema; mientras que el controlador algebraico es el que tiene un bajo desempeño en tiempo de respuesta, establecimiento y señal de control, aunque el error del controlador algebraico se encuentra en el mismo rango que el controlador por modos deslizantes.

7.2 CONCLUSIONES

La concentración de la soda cáustica (NaOH) define el comportamiento del sistema en la neutralización de las aguas ácidas debido a que si posee una concentración bastante alta, el sistema presentaría una variable adicional en el modelo por las altas temperaturas que se presentan en la reacción llevada a cabo en el tanque reactor. Por esta razón la concentración de la soda cáustica (NaOH) en la que no interviene la variable de temperatura es una concentración de 1N (1 Normal).

A pesar de que el sistema puede volverse inestable en el momento que se agrega una cantidad errónea del agente neutralizante (NaOH), los controladores diseñados tuvieron una respuesta aceptable; es decir el error de los controladores fue bajo considerando la referencia con la cual se trabajó.

El sistema tiene un comportamiento bastante lento, esto permite que el actuador (Bomba Peristáltica) en el momento de la neutralización de las aguas ácidas no sea exigido por la señal de control, esto favorece el buen desempeño de las estrategias de control implementadas.

La verificación de los diferentes criterios para el controlador PI se observa que los tres criterios tienen una buena respuesta en el sistema, pero el criterio que mejor se comporta es el criterio de la integral del cuadrado del error (ICE), debido a que no presenta los sobrepicos generados por el controlador sin criterio y responde de una forma más rápida que el criterio por la integral del valor absoluto del error ponderado en el tiempo (ITAE).

La estrategia de control que tuvo un mejor desempeño fue el controlador mediante modos deslizantes, debido a que tuvo un tiempo de respuesta y establecimiento mucho más rápido que las demás estrategias de control implementadas, así como un bajo error con respecto a la referencia y una señal de control menos exigida.

REFERENCIAS

- [1] Nalco Chemical Company - Frank N. Kemmer and Jhon McCallion, "Manual del agua: Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones", Mc Graw-Hill. Tomo2, pp. 416-417, 2009.
- [2] David L. Rusell, "Tratamiento de aguas residuales, Un enfoque práctico", Editorial Reverté. Tomo2, pp. 43-45, 2012.
- [3] Nalco Chemical Company - Frank N. Kemmer and Jhon McCallion, "Manual del agua: Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones", Mc Graw-Hill. Tomo2, pp. 416-417, 2009.
- [4] Javier Peña Ortiz y William Pérez Vega, Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM), pp 2, 2009.
- [5] Javier Peña Ortiz y William Pérez Vega, Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM), pp 3, 2009.
- [6] Luciana Cadorin, Elvis Carissimi y Jorge Rubio, Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas, pp 2-4, Sep.2007.
- [7] Environmental Protection Agency, Origins of the EPA, 1992
- [8] Javier Peña Ortiz y William Pérez Vega, Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM), pp 15, 2009.
- [9] E. López Pamo, O.Aduvire y D. Barretino, Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro, pp 7, 2002.
- [10] Javier Peña Ortiz y William Pérez Vega, Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM), pp 18, 2009.
- [11] E. López Pamo, O.Aduvire y D. Barretino, Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro, pp 5, 2002.
- [12] E. López Pamo, O.Aduvire y D. Barretino, Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro, pp 4, 2002.
- [13] E. López Pamo, O. Aduvire y D. Barretino, Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro, pp 4, 2002.
- [14] Osvaldo Aduvire, Drenaje ácido de mina generación y tratamiento, Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente, 2006.

- [15] Luciana Cadorin, Elvis Carissimi, Jorge Rubio, Avance en el tratamiento de aguas ácidas de minas, Universidade Federal do Rio Grande, 2007.
- [16] Alfonso Romero, Silvana Flores, Walter Arévalo, Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita, Revista de la Facultad de Ingeniera Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, pp 85, 2010.
- [17] Evelio Enrique Rivero Ochoa, Diseño de una planta piloto para el tratamiento de aguas de mina, mina “Las Peñitas” en la vereda de Reginaldo municipio de Monguí – Boyacá, UPTC, 2010.
- [18] Raul Moreno, Jazmin Jimenez, Mejoramiento del actual tratamiento activo y propuesta de un método pasivo para el manejo de drenajes ácidos en el distrito minero auroargentífero vetas – California (Santander), Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [19] Johanna Díaz Álvarez, Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido, generado por la actividad minera en el municipio de Marmato – Caldas, Universidad de Manizales, 2013.
- [20] Gerardo Zamora, Vivian Zamora, Marcelo Gorrity, Propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante drenes anóxicos calizos, Revista Metalurgica N° 36, Universidad de Oruro, pp 37, 2015.
- [21] Alberto Nuñez Bernal, Reseña histórica del Centro Nacional Minero, INTERMIN, Ed 3, Año 4, 2001, <http://citma.tripod.com/nv/02032001.htm>.
- [22] Ana María Monguí Galvis, Edwin Alexander Puentes Balaguera y Román Ortega, Diagnóstico y plan de gestión de manejo ambiental mina didáctica del SENA, Revista Ecomatemático, Vol 3, Num 1, pp 75-76, 2014.
- [23] Ana María Monguí Galvis, Edwin Alexander Puentes Balaguera y Román Ortega, Diagnóstico y plan de gestión de manejo ambiental mina didáctica del SENA, Revista Ecomatemático, Vol 3, Num 1, pp 76, 2014.
- [24] Ana María Monguí Galvis, Edwin Alexander Puentes Balaguera y Román Ortega, Diagnóstico y plan de gestión de manejo ambiental mina didáctica del SENA, Revista Ecomatemático, Vol 3, Num 1, pp 81-82, 2014.
- [25] Evelio Enrique Rivero Ochoa, Diseño de una planta piloto para el tratamiento de aguas de mina, mina “Las Peñitas” en la vereda de Reginaldo municipio de Monguí – Boyacá, UPTC, pp 45, 2010.

- [26] Nalco Chemical Company - Frank N. Kemmer and Jhon McCallion, "Manual del agua: Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones", Mc Graw-Hill. Tomo2, pp. 212, 2009.
- [27] Química Analítica, Curvas de titulación ácido – base precipitación y complejos Redox, pp. 6, 2016.
- [28] Evelio Enrique Rivero Ochoa, Diseño de una planta piloto para el tratamiento de aguas de mina, mina "Las Peñitas" en la vereda de Reginaldo municipio de Monguí – Boyacá, UPTC, pp 34, 2010.
- [29] Evelio Enrique Rivero Ochoa, Diseño de una planta piloto para el tratamiento de aguas de mina, mina "Las Peñitas" en la vereda de Reginaldo municipio de Monguí – Boyacá, UPTC, pp 37, 2010.
- [30] Control de procesos – Método de sintonización de controladores PID, FACET – UNT, pp. 1, 2009.
- [31] M. L. L. Luyben William, Essentials Process Control, New York: McGraw-Hill International Series, pp 164, 1997.
- [32] J. M. Salamanca, Control Moderno, Apuntes de clase, UPTC.
- [33] K. Ogata, Modern Control Engineering, 5 ed., Boston, Massachussets: Prentice Hall, 2010.
- [34] K. S. Houfar Farzad, Adaptive Control of CSTR Using Feedback Linearization Based on Grey-Box Modeling, Networking, Sensing and Control, pp. 7-12, 2008.
- [35] J. M. Salamanca, Analisis y control con modelos algebraico diferenciales de la estabilidad en pequeña señal de sistemas de potencia eléctrica, Cali: Phd. tesis Universidad del Valle, 2009.
- [36] B. W. Astrom K.J, Adaptive Control, New York: Dover Publications Inc, 2008.
- [37] Samir Kouro R. y Rodrigo Musalem M., Técnicas Modernas en Automática - Control Mediante Lógica Difusa, pp 1, 2002.
- [38] Guanrong Chen and Trung Tat Pham, Introduction to: Fuzzy sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems, CRC, University of Houston, pp 1-9, 2001.
- [39] George Bojadziev and Maria Bojadziev, Fuzzy sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Applications, Vol 5, World Scientific, Chapter 4, 1998.

- [40] Brian Eduardo Fiestas Farfán, Control de un Evaporador Multietapas Mediante Lógica Difusa, Universidad de Piura, pp 7, 2007.
- [41] J. B. Rawlings, Dynamics and control of chemical reactors, distillation columns and batch processes, IFAC, Pergamon, pp 27-28, 1995.
- [42] Carolina A. Evangelista, Control de Sistemas No Lineales Por Modos Deslizantes de Segundo Orden. Aplicación a la Conversión de Energía Eólica, Universidad Nacional de la Plata, pp 66, 2012.
- [43] Salamanca. JM., Avella-Rodríguez. E.J, and Plazas-Rosas R.A., Control por LMI-Modos deslizantes aplicado a una clase de sistemas no lineales, México, VII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIINDET.vol 1. pp 1-8, 2010
- [44] Vadim Utkin, Jürgen Guldner and Jingxin Shi, Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems, CRC Press, Ed 2, 2009.
- [45] Asif Sabanovic, Leonid M. Fridman and Sarah Spurgeon, Variable Structure Systems from principles to implementation, IET, London, 2004.
- [46] Tribuladores SLU, Funcionamiento, cuidado y calibrado del medidor de pH, (abril 5 de 2016), <http://medidordeph.com/funcionamiento-cuidado-calibrado-medidor-de-ph>.
- [47] DFRobot, pH meter (SKU: SEN 0161), (abril 4 de 2016), [http://dfrobot.com/wiki/index.php?title=PH_meter\(SKU:_SEN0161\)](http://dfrobot.com/wiki/index.php?title=PH_meter(SKU:_SEN0161))
- [48] Talos Electronics, Sensor de Flujo por Efecto Hall YF-S201, (abril 4 de 2016), <https://www.taloselectronics.com/producto/sensor-de-flujo-por-efecto-hall-yf-s201/>
- [49] ASCO, Tecnología electroválvulas y válvulas Funcionamiento, terminología y tipos de construcción, (abril 8 de 2016), http://www.asconumatics.eu/images/site/upload/_es/pdf1/00005es.pdf
- [50] QuimiNet, Principio del funcionamiento de las bombas peristálticas, (abril 8 de 2016), <http://www.quiminet.com/articulos/principio-del-funcionamiento-de-las-bombas-peristalticas-32722.htm>
- [51] Yhorman Darío Ruiz García, Mantenimiento en motorreductores, (abril 8 de 2016), <http://wwwmecanicaindustrial.blogspot.com.co/2009/01/mantenimiento-en-motorreductores.html>

- [52] QuimiNet, Conozca las características y aplicaciones de las bombas sumergibles, (abril 9 de 2016), <http://www.quiminet.com/articulos/conozca-las-caracteristicas-y-aplicaciones-de-las-bombas-sumergibles-2715179.htm>
- [53] Lawn & Garden, Bombas Sumergibles – WP-300, (abril 9 de 2016), <http://www.lawn-garden.com.mx/catalogo-de-productos/producto/84/wp-300/>
- [54] Jorge García Tíscar, Arduino + Matlab/Simulink: Controlador PID, 2011, <https://wechoosethemoon.es/2011/07/21/arduino-matlab-simulink-controlador-pid/>
- [55] Arduino, Learning/Tutorials/Examples From Libraries, (abril 13 de 2016), <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>
- [56] Arduino, Arduino UNO & Genuino UNO, (abril 12 de 2016), <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [57] Arduino, Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560, (abril 12 de 2016), <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560#techspecs>
- [58] Naylamp Mechatronics, Tutorial de Uso del Módulo L298N, (abril 9 de 2016), http://www.naylampmechatronics.com/blog/11_Tutorial-de-Uso-del-M%C3%B3dulo-L298N.html
- [59] Hanker Electronics Technology, Baku BK/1501TA, (abril 2 de 2016), http://www.bakutool.com/view_44/id_78.html
- [60] W. Bequette, Process Dynamics Modeling, Analysis and Simulation, New Jersey: Prentice Hall PTR, pp 132, 1998.
- [61] A. B. C. Smith Carlos, Principles and Practice of Automatic Process Control, 2 ed., New York: John Wiley & Sons, pp 91, 1997.
- [62] Casimiro A. Rocha, José R. Escorcia Gutierrez, Neutralización de los niveles de pH por Medio de Lógica Difusa, Universidad Autónoma del Caribe, pp 6, 2010.
- [63] Moisés Duarte Filho, Síntese de controlador PID para controle de pH em um reator com otimização via algoritmos genéticos, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, pp 44, 2014.
- [64] Wilson Fabian Amaya, Oscar Alberto Cañón, Oscar F. Avilés, Control de pH para planta de tratamiento de aguas residuales, Universidad Militar Nueva Granada, pp 2, 2004.

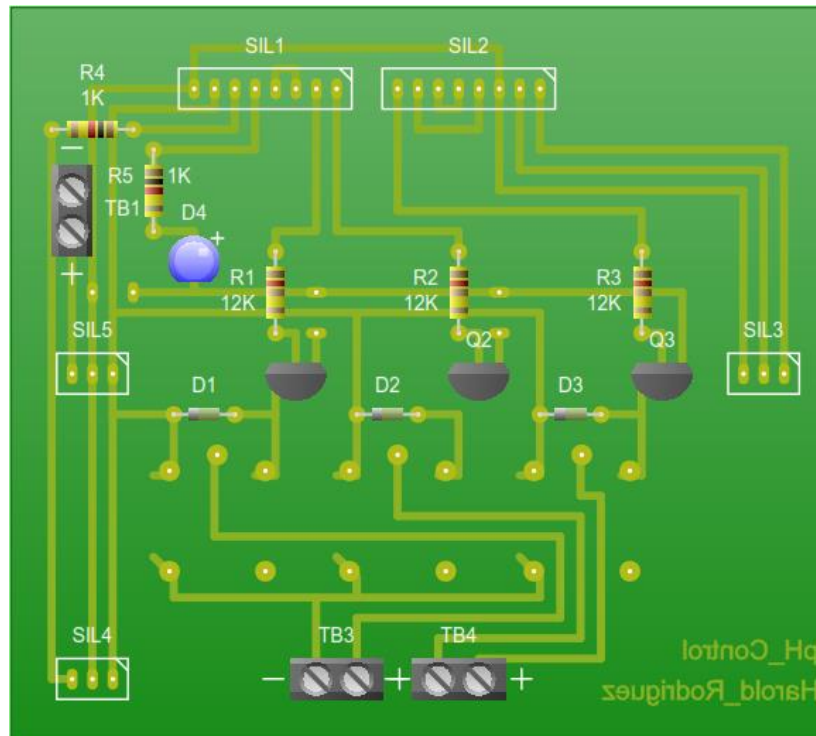
- [65] Mostefa Ghassoul, pH Control Using Matlab, University of Bahrain, pp 256, 2012.
- [66] Jiayu Kang, Mengxiao Wang, Zhongjun Xiao, Modeling and Control of pH in Pulp and Paper Wastewater Treatment Process, Shannxi University of Science & Technology, pp 125, 2009.
- [67] J. Distefano III, Dynamics Systems Biology Modeling and Simulations, Amsterdam: Academic Press, pp 296, 2013.
- [68] J. M. Salamanca, Control Moderno, Apuntes de clase, UPTC.

ANEXOS

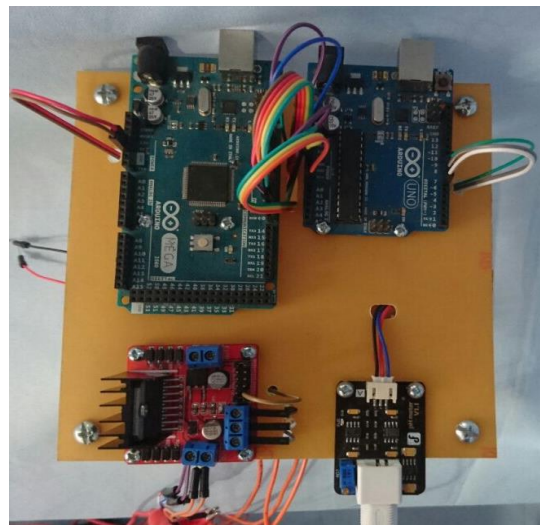
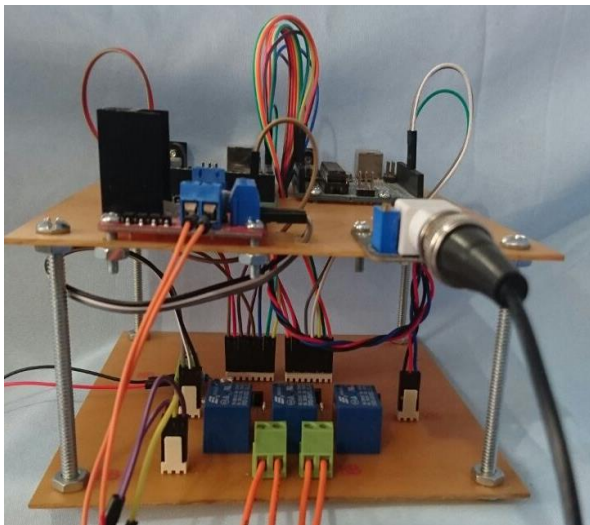
Anexo 1a. Prototipo implementado.



Anexo 1b. Prototipo implementado.



Anexo 2. Esquemático para etapas de potencia y adquisición de señales.



Anexo 3. Circuito para etapas de potencia y adquisición de señales implementado.

PH composite electrode manual

A. Purpose

The electrode is made of PH glass electrode and a silver/silver chloride reference electrode composition, the PH measuring elements which is used to measure water solution PH value.

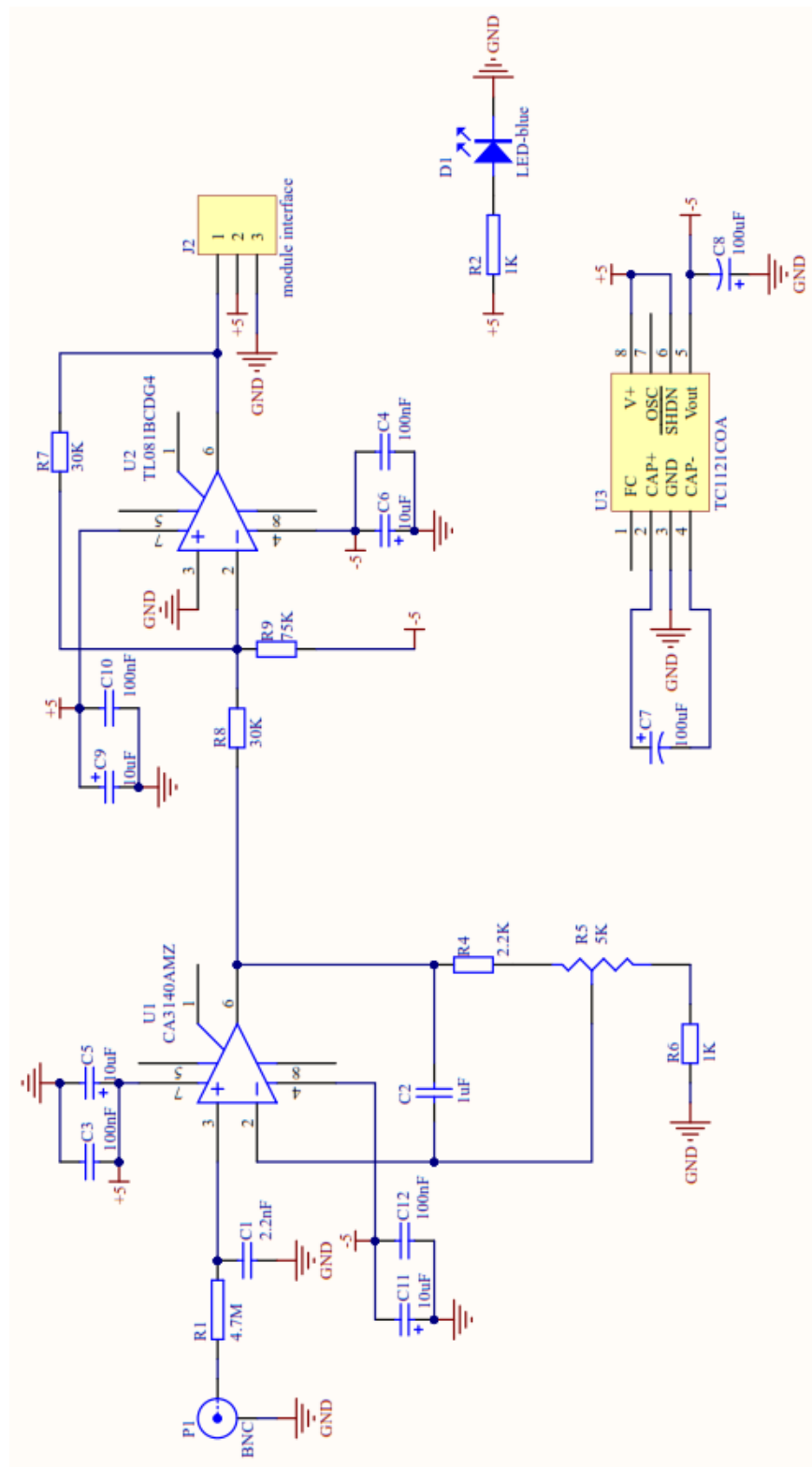
B. Type and main technical parameters

Electrode type	range	temperature	Zero point	Alkali deviation	PTS	Response time	Internal resistance	Repeat ability	Noise
	PH	°C	PH	mV		min	MΩ		mV
65-1	0-14	0-80	7 ± 1	<15	>98	<2	<250	<0.017	
BX-5	0-14	0-80	$7X \pm 11$	<15	>98	<2	<250	<0.017	
E-201	0-14	0-80	7 ± 0.5	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
E-201-C	0-14	0-80	$7X \pm 0.5$	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
95-1	0-14	0-80	$7X \pm 0.5$	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5
E-900	0-14	0-80	$7X \pm 0.5$	<15	>98	<2	<250	<0.017	<0.5

C. Precautions

1. The electrode used for the first or long set without re-use, the electrode bulb and the sand core, immersed in the 3NKCL solution activated eight hours.
2. The electrode plug should be kept clean and dry.
3. Electrode reference solution is the 3NKCL solution.
4. Measurement should be avoided staggered pollution between solutions, so as not to affect the accuracy of measurement.
5. Electrode blub or sand core is defiled which will make PTS decline, slow response. So, it should be based on the characteristics of the pollutant, adapted to the cleaning solution, the electrode performance recovery.
6. The electrode should not be long-term immersed in acid chloride solution.
7. Electrode when in use, the ceramic sand core and liquid outlet rubber ring should be removed, in order to make salt bridge solution to maintain a certain velocity.

Anexo 4. Manual sensor de pH SEN0161.



Anexo 5. Esquemático circuito interfaz pH meter V1.0 para el sensor de pH.

Flow-Pulse	Flow-Curve	Connection method
Flow Range:100L/H-1800H-L/H		
Flow (L/H)	Frezq.(HZ)	Erro range ±10
120L/H	16	
240L/H	32.5	
360L/H	49.3	
480L/H	65.5	
600L/H	82	
720L/H	90.2	

Connection method:

YIFA the plastics Ltd
Prodcut Introduction

1.Modle:YF-21
2.Product Name:Hall sensor
3.Flow Range: 1-30L/MIN
4.(1)Connection Method

(2)Voltage Range 3.5-24VDC, Pulse Characteristic:F=7Q(L/MIN)
(3)Extent of error:±5%
(4)Flow-Pulse
2L/MIN=16HZ 4L/MIN=32.5HZ 6L/MIN=49.3HZ
8L/MIN=65.5HZ 10L/MIN=82HZ

5.Bom

No.	Item	Material	Qty.
1	Connection wire		1
2	Bonnet	PA	1
3	Screw		4
4	Valve body	PA	1
5	Leak press valve		1
6	Magnet		1
7	Hall		1
8	Impeller	POM	1
9	Rustless steel axis	SUS304	1
10			
11			

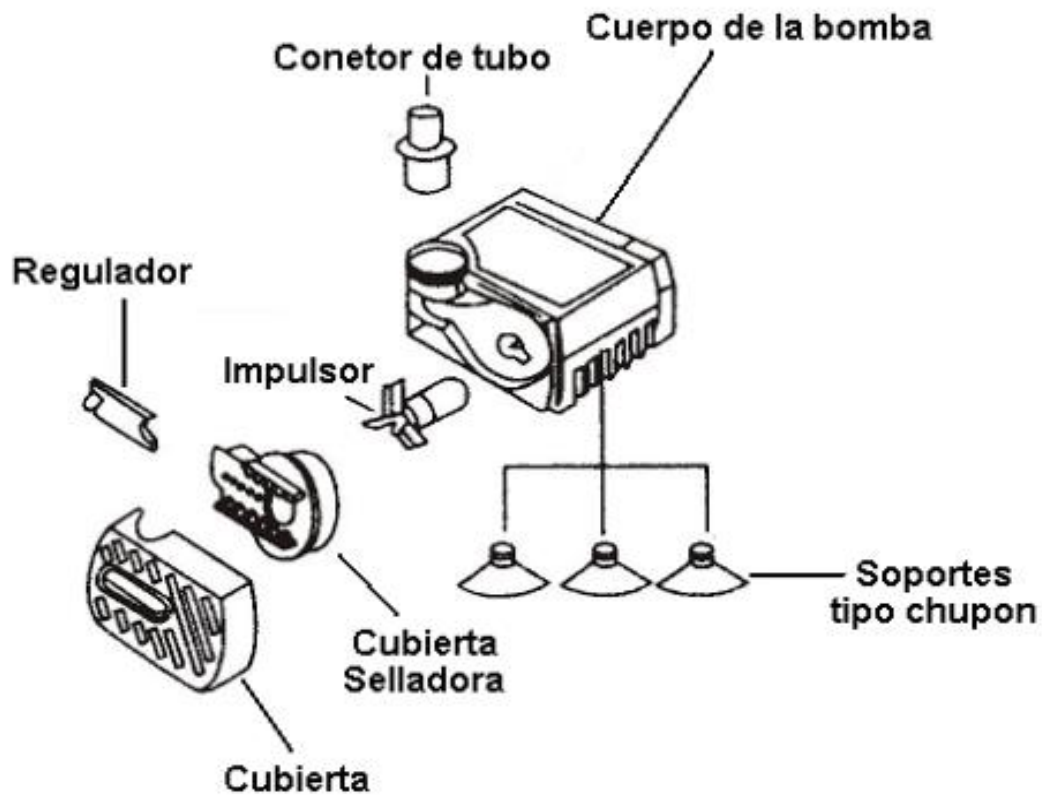
Anexo 6. Manual sensor de flujo YF-S201.

Pipe Size (in)	Orifice Size (in)	Cv Flow Factor	Operating Pressure Differential (psi)						Max. Fluid Temp. °F		Brass Body		Stainless Steel Body		Watt Rating/Class of Coil Insulation (2)	
			Max. AC			Max. DC					Catalog Number	Const. Ref.	Catalog Number	Const. Ref.		
			Air-Inert Gas	Water (3)	Lt. Oil @ 300 SSU	Air-Inert Gas	Water (3)	Lt. Oil @ 300 SSU	AC	DC					AC	DC
UNIVERSAL OPERATION (Pressure at any port)																
1/8	3/64	0.06	175	175	175	125	125	125	140	120	8320G130 (1)	1	8320G140 (1)	1	9.1F	10.6F
1/8	1/16	0.09	100	100	100	65	65	65	180	120	8320G001	1	8320G041 (3)	1	9.1F	10.6F
1/8	1/16	0.09	175	175	175	125	125	125	200	150	8320G212	4	8320G221 (4)(6)	4	17.1/F	22.6/F
1/8	3/32	0.12	50	50	50	50	50	50	180	120	8320G083	1	8320G087 (3)	1	6.1/F	10.6/F
1/8	3/32	0.12	100	100	100	60	60	60	200	150	8320G213	4	8320G222 (4)	4	17.1/F	11.6/F
1/8	1/8	0.21	30	30	30	20	20	20	180	120	8320G003	1	8320G043 (3)	1	9.1/F	10.6/F
1/8	1/8	0.21	50	50	50	25	25	25	200	150	8320G214	4	8320G223 (4)	4	17.1/F	11.6/F
1/4	1/16	0.09	125	130	130	75	75	75	200	150	8320G172	2	-	-	10.1/F	11.6/F
1/4	1/16	0.09	175	175	175	125	125	125	200	150	-	-	8320G230 (4)(6)	3	17.1/F	22.6/F
1/4	3/32	0.12	100	100	100	60	60	60	200	150	8320G174	2	8320G200 (3)(4)(6)	3	17.1/F	11.6/F
1/4	1/8	0.25	50	50	50	25	25	25	200	150	8320G176 (6)	2	8320G201 (3)(4)(6)	3	17.1/F	11.6/F
1/4	11/64	0.35	20	20	20	12	12	12	200	150	8320G178	2	-	-	10.1/F	11.6/F
NORMALLY CLOSED (Closed when de-energized) – PFD_{avg} = 6.81 x 10⁻⁴																
1/8	3/64	0.06	200	200	200	200	200	200	180	120	8320G132	1	8320G142 (3)	1	6.1F	10.6/F
1/8	1/16	0.09	150	125	125	125	125	125	180	120	8320G013	1	8320G045 (3)	1	6.1F	10.6/F
1/8	1/16	0.09	210	225	225	160	160	160	200	150	8320G215	4	8320G224 (4)	4	17.1/F	11.6/F
1/8	3/32	0.12	100	100	100	100	100	100	180	120	8320G015	1	8320G047 (3)	1	6.1F	10.6/F
1/8	3/32	0.12	150	150	150	115	115	115	200	150	8320G216	4	8320G225 (4)	4	10.1/F	11.6/F
1/8	1/8	0.21	40	40	40	40	40	40	180	120	8320G017	1	8320G049 (3)	1	6.1F	10.6/F
1/8	1/8	0.21	85	85	85	60	60	60	200	150	8320G217	4	8320G226 (4)	4	10.1/F	11.6/F
1/4	1/16	0.09	210	225	225	160	160	160	200	150	8320G182 (6)	2	8320G231 (4)	3	17.1/F	11.6/F
1/4	3/32	0.12	150	150	150	115	115	115	200	150	8320G184	2	8320G202 (3)(4)(6)	3	10.1/F	11.6/F
1/4	1/8	0.25	85	85	85	60	60	60	200	150	8320G186	2	8320G203 (3)(4)(6)	3	10.1/F	11.6/F
1/4	11/64	0.35	45	45	45	25	25	25	200	150	8320G188	2	-	-	10.1/F	11.6/F

Anexo 7. Especificaciones electroválvula 8320G184.


CARACTERISTICAS TECNICAS						
MODELO	GASTO MAX.		CARGA MAX.		TENSION (Volts)	POTENCIA
	LPH	GPM	Metros	Kgs/cm ²	A 60 Hz	WATTS
300	150	0.660	0.50	0.050	120	2.5

ENSAMBLAJE						
------------	--	--	--	--	--	--



Anexo 8. Especificaciones y partes de la bomba sumergible WP-300.

SONGLE RELAY

	RELAY ISO9002	SRD
---	---------------	------------



1. MAIN FEATURES

- Switching capacity available by 10A in spite of small size design for highdensity P.C. board mounting technique.
- UL,CUL,TUV recognized.
- Selection of plastic material for high temperature and better chemical solution performance.
- Sealed types available.
- Simple relay magnetic circuit to meet low cost of mass production.

2. APPLICATIONS

- Domestic appliance, office machine, audio, equipment, automobile, etc.
(Remote control TV receiver, monitor display, audio equipment high rushing current use application.)

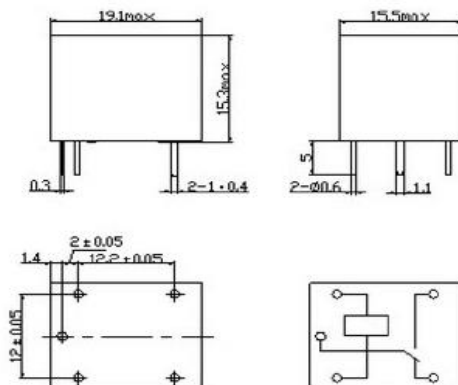
3. ORDERING INFORMATION

SRD	XX VDC	S	L	C
Model of relay	Nominal coil voltage	Structure	Coil sensitivity	Contact form
SRD	03、05、06、09、12、24、48VDC	S:Sealed type	L:0.36W	A:1 form A
		F:Flux free type	D:0.45W	B:1 form B C:1 form C

4. RATING

CCC FILE NUMBER: CQC03001003731 10A/250VDC
 UL/CUL FILE NUMBER: E167996 10A/125VAC 28VDC
 TUV FILE NUMBER: R 50056114 10A/250VAC 30VDC

5. DIMENSION (unit:mm) DRILLING (unit:mm) WIRING DIAGRAM



Anexo 9. Especificaciones y partes relé 5Vdc.

APÉNDICE A

CÓDIGO IMPLEMENTADO EN ARDUINO MEGA 2560

```

//Variables para controlar la cantidad de agua a tratar
volatile int rpmcont; // lleva el conteo de los pulsos del sensor de flujo
int Calc;
int out = 0;
int out2 = 0;
int in = 0;
//Variables para la dosificacion de NaOH

//Declaracionde pines del sistema
byte pin_Hab = 6; //pin comunicacion entre los arduinos (inicio del sistema)
byte pin_Hab2 = 7; //pin comunicacion entre los arduinos (inicio del sistema)
byte pin_Hab3 = 8; //pin comunicacion entre los arduinos (evacuación aguas tratadas)
byte pin_led = 11; //pin comunicacion entre los arduinos (terminacion de la cantidad de agua a tratar)
byte pin_Sensor = 2; //entrada del sensor de flujo
byte pin_Bomba = 3; //Bomba Sumergible
byte pin_Valvula = 5; //Valcula ON/OFF cantidad de agua a tratar
byte pin_Agitador = 4; //Agitador
byte pinOut = 10; //señal PWM para Bomba Peristaltica

void setup() {
  // Declaraciond de pines I/O
  pinMode(pin_Hab, INPUT);
  pinMode(pin_Hab2, INPUT);
  pinMode(pin_Hab3, INPUT);
  pinMode(pin_Sensor, INPUT);
  pinMode(pin_Bomba, OUTPUT);
  pinMode(pin_Valvula, OUTPUT);
  pinMode(pin_led, OUTPUT);
  pinMode(pinOut, OUTPUT);
  pinMode(pin_Agitador, OUTPUT);

  digitalWrite(pin_Hab, LOW);
  digitalWrite(pin_Hab2, LOW);
  digitalWrite(pin_Hab3, LOW);
  digitalWrite(pin_led, LOW);
  digitalWrite(pin_Sensor, HIGH);
  digitalWrite(pin_Bomba, LOW);
  digitalWrite(pin_Valvula, LOW);
  digitalWrite(pin_Hab, LOW);
  digitalWrite(pin_Agitador, LOW);

  // inicializar puerto serie
  Serial.begin(19200);
  rpmcont=0;
  Calc=0;
}

void loop() {
  //Procesos para el control de pH

```

```

//Pin_Hab | Pin_Hab2 | Pin_Hab3 |
// 0      | 0        | 0        | Sistema detenido
// 0      | 0        | 1        | Mezcla limon con aguas acidas
// 1      | 0        | 0        | Cantidad de agua a tratar 1 litro
// 0      | 1        | 0        | Neutralización de aguas acidas
// 1      | 1        | 0        | Drenaje aguas tratadas

//Cantidad de agua a tratar
if ((digitalRead(pin_Hab) == HIGH) && (digitalRead(pin_Hab2) == LOW))
{
attachInterrupt(0 , rpm, FALLING); //Declaracion de la interrupcion por falco descendente (Sensor de
Flujo)
Flujo();
}

//Neutralización de aguas acidas
if ((digitalRead(pin_Hab) == LOW) && (digitalRead(pin_Hab2) == HIGH))
{
digitalWrite(pin_led, LOW);
digitalWrite(pin_Agitador, HIGH);
pH();
}

//Sistema detenido
if ((digitalRead(pin_Hab) == LOW) && (digitalRead(pin_Hab2) == LOW))
{
analogWrite(pinOut, 0);
digitalWrite(pin_Bomba, LOW);
digitalWrite(pin_Agitador, LOW);
digitalWrite(pin_Valvula, LOW);
digitalWrite(pin_led, LOW);
rpmcont=0;
Calc=0;
}

//Drenaje aguas tratadas
if ((digitalRead(pin_Hab) == HIGH) && (digitalRead(pin_Hab2) == HIGH))
{
digitalWrite(pin_Bomba, HIGH);
digitalWrite(pin_Agitador, LOW);
digitalWrite(pin_led, LOW);
delay(1000);
}

//Mezcla de 1 litro de aguas acidas y 50ml de sumo de limon
if ((digitalRead(pin_Hab3) == HIGH))
{
digitalWrite(pin_Agitador, HIGH);
digitalWrite(pin_led, HIGH);
delay(1000);
}

digitalWrite(pin_Bomba, LOW);

```

```
digitalWrite(pin_Valvula, LOW);
digitalWrite(pin_led, LOW);
digitalWrite(pin_Agitador, LOW);
}
```

```
// Funcion para llevar el conteo de pulsos del sensor de flujo
```

```
void rpm()
{
  rpmcont++;
}
```

```
//Funcion para Agregar 1 litro de agua acida a tratar
```

```
void Flujo()
{
  if ((Calc <=500))
  {
    sei();
    digitalWrite(pin_Valvula, HIGH);
    digitalWrite(pin_led, LOW);
    Serial.print (rpmcont,DEC);
    Serial.print ("\r\n");
    Calc = rpmcont * 1.0;
  }
  else
  {
    digitalWrite(pin_Valvula, LOW);
    digitalWrite(pin_led, HIGH);
    digitalWrite(pin_Agitador, HIGH);
    delay(5000);
    cli();
  }
}
```

```
//Función para recibir los datos de los controladores para
```

```
//convertirlos en una señal PWM para controlar la bomba peristaltica
```

```
void pH()
{
  while (Serial.available())
  {
    // recepción de datos del controlador
    in = Serial.read();
    delay(20);
    // mapeo de datos PWM para bomba peristaltica
    out = map(in, 0, 50, 0, 255);
    out2= map(out, 0, 255, 65, 255);
    Serial.write(out);
    //señal PWM hacia bomba persitaltica
    analogWrite(pinOut, out2);
    delay(20);
  }
  delay(20);
}
```

APÉNDICE B

CÓDIGO IMPLEMENTADO EN MATLAB LLENADO DE TANQUE REACTOR

```

%LLENADO TANQUE REACTOR
puerto=arduino('COM5');      %Declaracion puerto arduino UNO
pin_Hab = 6;                  %Pines de control del sistema
pin_Hab2 = 7;
pin_Hab3 = 8;
puerto.pinMode (pin_Hab, 'OUTPUT'); %Declaracion I/O pines
puerto.pinMode (pin_Hab2,'OUTPUT');
puerto.pinMode (pin_Hab3,'OUTPUT');
%ACTIVACION MODO LLENADO TANQUE REACTOR
puerto.digitalWrite (pin_Hab ,1);
puerto.digitalWrite (pin_Hab2 ,0);
puerto.digitalWrite (pin_Hab3 ,0);
pause(0.1);
%DECLARACION DE VARIABLES PARA GRAFICAR DATOS DEL SENSOR DE pH
Stop=1;
i=0;
pH_T=0;
time = 0;
pH= 0;
uicontrol('Style','Pushbutton','String','parar',.....
'Callback','Stop=0;')
clear figure(1);
hold off
tic;          %Inicio graficar
while Stop
    %TOMA DE DATOS DEL SENSOR DE pH
    S_pH = (puerto.analogRead(0)*5/1023)*3.5; %Conversion de voltaje a pH
    pH_T = S_pH;
    pause(0.0001);
    %GRAFICACION DE DATOS SENSOR DE pH
    i=i+1;
    time(i) = toc;
    pH(i) = pH_T;
    figure(1)
    grid on
    plot(time,pH,'r','LineWidth',2)
    title('Subplot 1: pH')
    ylim([0.5,15.1])
    pause(0.00001);
%TOMA DE DATOS DEL SENSOR DE NIVEL
S_Nvl = (puerto.analogRead(1)*5/1023);
if (S_Nvl < 4)
    puerto.digitalWrite (pin_Hab ,0);
    pause(0.001);
    puerto.digitalWrite (pin_Hab2 ,0);
    pause(0.001);
    puerto.digitalWrite (pin_Hab3 ,1);

```

```

    pause(0.001);
end
end
% ACTIVACION MODO MEZCLA LIMON CON AGUAS ACIDAS
puerto.digitalWrite (pin_Hab ,0);
pause(0.001);
puerto.digitalWrite (pin_Hab2 ,0);
pause(0.001);
puerto.digitalWrite (pin_Hab3 ,1);
pause(0.001);

```

APÉNDICE C

CÓDIGO IMPLEMENTADO EN MATLAB-SIMULINK NEUTRALIZACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS

```

%CONTROLADORES
%BUSQUEDA DE ARCHIVO PARA CONTROLADORES

%PARA CONTROLADOR PI
% find_system('Name','Controlador_PI');
% open_system('Controlador_PI');

%PARA CONTROLADOR POR LOGICA DIFUSA
% find_system('Name','Controlador_Logica_Difusa');
% open_system('Controlador_Logica_Difusa');

%PARA CONTROLADOR ALGEBRAICO
% find_system('Name','Controlador_Algebraico');
% open_system('Controlador_Algebraico');

%PARA CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES
% find_system('Name','Controlador_Deslizante');
% open_system('Controlador_Deslizante');

%DECLARACION DE VARIABLES PARA GRAFICAR DATOS DEL SENSOR DE pH
clc;
cla reset;
cla;
i=0;
Val_pH=0;
Val_Ap=0;
V_Sim=0;
V_Sim_T=0;
pH_T=0;
time = 0;
pH= 0;
Stop=1;
uicontrol('Style','Pushbutton','String','parar',.....
'Callback','Stop=0;')
clear figure(1);
hold off

```

```

%INICIO DE LA SIMULACION
set_param(gcs,'SimulationCommand','Start');

%ACTIVACION MODO NEUTRALIZACION DE AGUAS ACIDAS
puerto.digitalWrite (pin_Hab3 ,0);
puerto.digitalWrite (pin_Hab ,0);
puerto.digitalWrite (pin_Hab2 ,1);
pause(0.1);
%Inicio graficar
tic;
while Stop
    %TOMA DE DATOS DEL SENSOR DE pH
    S_pH = (puerto.analogRead(0)*5/1023)*3.5; %Conversion de voltaje a pH
    %S_pH = (puerto.analogRead(0)*5/1023);%Para Controlador PI
    pH_T = S_pH;
    Val_pH = num2str(pH_T);
    %ENVIO DE DATOS SENSOR DE pH A SIMULINK

    %PARA CONTROLADOR PI
    %set_param('Controlador_PI/S_pH/Constant2','Value',Val_pH);

    %PARA CONTROLADOR POR LOGICA DIFUSA
    %set_param('Controlador_Logica_DIfusa/S_pH/Constant2','Value',Val_pH);

    %PARA CONTROLADOR ALGEBRAICO
    %set_param('Controlador_Algebraico/S_pH/Constant2','Value',Val_pH);
    %PARA CONTROLADOR POR MODOS DESLIZANTES

    %set_param('Controlador_Deslizante/S_pH/Constant2','Value',Val_pH);
    pause(0.0001);

    %GRAFICACION DE DATOS SENSOR DE pH
    i=i+1;
    time(i) = toc;
    pH(i) = pH_T;
    figure(1)
    plot(time,pH,'r','LineWidth',2)
    title('Subplot 1: pH')
    ylim([-0.1,15.1])
    pause(0.00001);
end

%ACTIVACION MODO DRENAJE DE AGUAS TRATADAS
puerto.digitalWrite (pin_Hab ,1);
pause(0.001);
puerto.digitalWrite (pin_Hab2 ,1);
pause(0.001);
puerto.digitalWrite (pin_Hab3 ,0);
pause(0.001);
set_param(gcs,'SimulationCommand','Stop'); %Parar Simulacion

```

APÉNDICE D

CÓDIGO IMPLEMENTADO EN MATLAB CALCULO DE POLINOMIOS CONTROLADOR ALGEBRAICO

```

%Control para el modelo lineal del Reactor
%considerando el retardo de transporte
clc
clear all
%Parametros de la curva de reaccion
Kp = 1.051;% Ganancia del proceso
Tp = 170.25; % Constante de tiempo
Thp = 14.05;% Retardo de transporte
%Tm=0.01_deslizante
Tm = 2;% Tiempo de muestreo es divisor del retardo de transporte
% Discretizacion del modelo de tiempo continuo
ap1 = exp(-Tm/Tp);% Parametro ap
bpo = Kp*(1-ap1);% Parametro bpo
d = floor(Thp/Tm)+1; % Retardo discreto

% Calculo de los parametros del controlador
% Calculo de los parametros del polinomio Acd
for k = 1:d-1,
    Acd(k) = ap1^k;
end

Dcd =[ 1 Acd];
Nrd = zeros(1,d);%Determinacion del polinomio Nrd
Nrd(1,1) = 1/bpo% Polinomio Nrd

% Calculo de los parametros del polinomio BFd
bfdo = (ap1^d)/bpo;% Parametro bfdo
Nfd = zeros(1,d);
Nfd(1,1) = bfdo;

```

APÉNDICE E

CÓDIGO IMPLEMENTADO EN MATLAB SISTEMA DETENIDO

```

%SISTEMA DETENIDO
%ACTIVACION SISTEMA DETENIDO
puerto.digitalWrite (pin_Hab2 ,0);
puerto.digitalWrite (pin_Hab ,0);
puerto.digitalWrite (pin_Hab3 ,0);
pause(0.1);

```