

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Control de ph constante en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
de Sigma Alimentos**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Nelson Brenes Leandro

Cartago, Junio del 2009



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal


Ing. Johan Carvajal Godinez.
Profesor asesor


Ing. Marvin Hernández Cisneros.
Profesor lector

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 18 de Junio de 2009

Declaratoria de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, Junio de 2009

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized letters 'NB' and 'LLK' intertwined, written over a horizontal line. The signature is positioned above the text 'Firma del autor'.

Firma del autor

Nelson Brenes Leandro.

Cédula: 1-1232-0272

RESUMEN

Actualmente es necesaria la incorporación de plantas de tratamiento de aguas residuales en empresas con alta demanda en la industria de alimentos. Precisamente, Sigma Alimentos es una empresa que recientemente ha incorporado una de ellas en su industria.

El producto que ingresa a dicha planta contiene elevados niveles de acidez, conductividad, grasas y contaminantes sólidos los cuales provienen de los distintos procesos industriales dedicados a la producción de yogurt y quesos.

Según disposiciones de los ingenieros químicos, se requiere de un nivel constante de pH en un punto específico de la planta de tratamiento, para garantizar un rango de acidez que impida elevados niveles de toxicidad en el fluido final, y de esta manera evitar la contaminación de los sumideros en los cuales se deposita.

Según el Decreto Ejecutivo Canon Ambiental por Vertidos, N° 31176-MINAE este nivel debe establecerse en un rango definido entre 6 y 8.5, cuyo valor permite una acidez cercana a la neutra, la cual posee un valor de 7. El sistema de control descrito integra dispositivos electrónicos tales como: sensores de pH, nivel, bombas dosificadoras, válvulas y adicionalmente un microcontrolador encargado del procesamiento de datos.

Palabras claves: bombas dosificadoras, control automático, pH, procesamiento de datos, sistema de control.

ABSTRACT

Actually, it's necessary the incorporation of a plant of waste water treatment in companies with high demand in the food industry. Actually, Sigma Alimentos is a company that has incorporated one of these plants in its industry.

The incoming product contains high levels of acidity, conductivity, fats and solid pollutants which come from the different industrial processes of yogurt and cheeses. According to regulations of the chemical engineers, it is needed of a constant level of pH in a specific point of the plant of treatment to guarantee a range of acidity that prevents high levels of toxicity in its final product to avoid the pollution of the sinks in which it settles.

With agreement 31176-MINAE, this level must settle in a defined range between 6 and 8.5, which value allows the acidity close to neutral equal 7. The system just described integrates electronic devices like: pH sensors, level sensors, bombs, valves and additionally a controller for charge of the process of data information.

Keywords: bombs, pH, process of data, control system.

Dedicatoria

La actitud inmutable me ha impulsado a lograr este grandioso momento en mi vida. Este indudable triunfo se lo dedico a alguien más que una persona, se lo dedico a aquella que día a día me entrega su vida, en forma desinteresada, con el objeto de percibir mi crecimiento personal e integral.

Dedicado enteramente a ella, quien desde mi niñez me ha permitido visualizar el camino que converge al enrutamiento de las mejores oportunidades para mi bienestar, hoy una prueba de ello. Esta persona es mi grandiosa madre.

Agradecimiento

Deseo agradecer al gremio de mi profesorado universitario por brindar su esfuerzo para la preparación de nosotros los estudiantes de esta casa de enseñanza. Gracias a su dedicación, obtuve los conocimientos necesarios para integrar soluciones que requieren un nivel de ingeniería en el campo industrial.

De la misma manera, deseo agradecer a todas las personas que me brindaron su apoyo en todo momento en la realización de esta aspiración personal, a aquellas que en forma honesta se convirtieron en pilares fundamentales a través de sus consejos.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Problema existente e importancia de solución	1
1.2 Solución seleccionada.....	3
Capítulo 2: Meta y objetivos	4
2.1 Meta	4
2.2 Objetivo general	4
2.3 Objetivos específicos	4
Capítulo 3: Marco teórico	5
3.1 Descripción del sistema	6
3.2 Antecedentes bibliográficos	7
3.2.1 Escala de pH.....	7
3.2.2 Neutralización de pH.....	8
3.2.3 Mecanismo de control de pH	11
3.2.4 Tipos de reactores	14
3.3 Descripción de los principales principios físicos relacionados y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.	17
3.3.1 Conceptos para el análisis de la respuesta al escalón.....	17
3.3.2 Estabilidad de un sistema según el criterio de Routh-Hurwitz	18
Capítulo 4: Procedimiento Metodológico.....	21
4.1 Reconocimiento y definición del problema	21
4.2 Obtención y análisis de información	21
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	22
4.4 Reevaluación y rediseño	23
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución final	24
5.1 Modelado de la planta	24
5.2 Selección de hardware.....	30
5.3 Implementación de hardware	43
5.4 Implementación del software	44
Capítulo 6: Análisis de resultados.	53
6.1 Simulación del modelo obtenido	53
6.2 Diseño del compensador PI	56
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	67
7.1 Conclusiones	67
7.2 Recomendaciones.....	68
Bibliografía	69

Apéndices	71
A.1 Glosario.....	71
A.2 Información sobre la empresa/institución	72
A.2.1 Descripción de la empresa.....	72
A.2.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto	73
A.3 Calibración del sensor de pH.....	74
ANEXOS.....	76
ANEXO A. Proceso de saneamiento en la Planta de tratamiento de Aguas Residuales de Sigma Alimentos	76
A.1 Proceso de tamizado grueso.....	76
A.2 Tamizado fino	76
A.3 Regulación / Homogenización.....	76
A.4 Tratamiento primario	76
A.5 Sistema de separación de sólidos por flotación DAF.....	77
A.6 Tratamiento secundario.....	77
ANEXO B. Hojas de datos de los instrumentos utilizados en el sistema de control de pH... 80	
B.1 Sensor de pH.....	80
B.2 Principales características de la bomba dosificadora.	82
B.3 Especificaciones del PLC Micrologix1100.....	85
B.4 Especificaciones de la comunicación Ethernet.	86
B.5 Información del bloque PID para Micrologix 1100	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1	Diagrama simplificado del proceso de tratamiento de aguas residuales.	2
Figura 1.2.1	Diagrama de bloques general del sistema de control implementado	3
Figura 3.1.1	Diagrama de bloques del sistema implementado.	6
Figura 3.2.1	Escala de pH para valores cercanos al valor neutro.....	7
Figura 3.2.2	Control por lotes para la variable de pH.....	12
Figura 3.2.3	Control por tanque continuo para la variable de pH.....	13
Figura 3.2.4	Control por proceso de canal o tanque continuo.	13
Figura 3.2.5	Reactor de cocheda de mezcla completa	15
Figura 3.2.6	Reactor de flujo continuo y mezcla completa.....	15
Figura 3.2.7	Reactor de flujo de pistón.....	16
Figura 3.3.1	Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón unitario [4]	18
Figura 5.1.1	Modelo físico del sistema a analizar.	24
Figura 5.1.2	Diagrama de bloques de la función de transferencia de la ecuación 5.1.6.	26
Figura 5.1.3	Nivel de pH versus la concentración del flujo de entrada	28
Figura 5.1.4	Linealización del sensor de pH.	29
Figura 5.1.5	Diagrama final del modelo a implementar.....	29
Figura 5.2.1	Vista frontal de la bomba dosificadora para el control de pH constante.....	30
Figura 5.2.2	Curva de porcentaje versus miliamperios para la dosificación de base.	32
Figura 5.2.3	Esquemático de la bomba de dosificación para el control de pH constante.	32
Figura 5.2.4	Vista frontal del gabinete de control implementado.	33
Figura 5.2.5	Esquema del PLC Micrologix 1100 utilizado para el control de pH constante.	34
Figura 5.2.6	Módulo de entrada analógica 1762-IF4.....	35
Figura 5.2.7	Conexión de dispositivos analógicos al módulo 1762-IF4.	36
Figura 5.2.8	Configuración del módulo de salida 1762-OF4 con el software RSlogix500.	37

Figura 5.2.9	Principio de funcionamiento del sensor de pH.....	38
Figura 5.2.10	Representación del electrodo de vidrio del sensor de pH.	39
Figura 5.2.11	Electrodo de referencia clásico para un sensor de pH.	40
Figura 5.2.12	Sensor de pH utilizado.	40
Figura 5.2.13	Vista frontal del transmisor del sensor de pH.	41
Figura 5.2.14	Ubicación de las salidas analógicas para el HACH	42
Figura 5.4.1	Plataforma del software RSLogix500	45
Figura 5.4.2	Propiedades del controlador.	45
Figura 5.4.3	Diagrama de flujo a seguir para el controlador diseñado.	47
Figura 5.4.4	Diagrama de flujo del control AUTO de la bomba dosificadora.	48
Figura 5.4.5	Entorno de programación del RSView32.	49
Figura 5.4.6	Pantalla de visualización general del proceso	50
Figura 5.4.7	Pantalla de configuración de modo de la bomba dosificadora de base.....	51
Figura 5.4.8	Pantalla de información de alarmas.	52
Figura 5.4.9	Pantalla de visualización del pH en la salida del tratamiento primario.	52
Figura 6.1.1	Espacio de trabajo del software Matlab	53
Figura 6.1.2	Cuadro de diálogo para el buscador de librerías de Simulink.....	54
Figura 6.1.3	Espacio de trabajo para implementar el sistema en software Simulink.	54
Figura 6.1.4	Señal periódica de entrada para la simulación del sistema sin compensador	55
Figura 6.1.5	Respuesta del modelo del sistema a implementar sin compensador.....	56
Figura 6.2.1	Diagrama de control implementado con controlador PI.	57
Figura 6.2.2	Respuesta del sistema con y sin controlador PI.	61
Figura 6.2.3	Curvas teórica y experimental obtenidos a la salida del sistema de control.....	63
Figura 6.2.4	Gráfica obtenida a la salida de la Planta de tratamiento con controlador.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.2.1	Tipo de aguas residuales que generan ciertas industrias de proceso.	9
Tabla 3.2.2	Ejemplos de sustancias a diferentes niveles de pH	10
Tabla 5.2.1	Módulos de entradas y salidas compatibles con el controlador MicroLogix 1100..	34
Tabla 5.2.2	Especificaciones del transmisor de pH utilizado	41
Tabla 6.1.1	Datos teóricos de simulación en Simulink.	55
Tabla 6.2.1	Valores obtenidos en el PLC con el controlador implementado	62
Tabla 6.2.2	Porcentajes de error de parámetros en el dominio del tiempo.	63
Tabla 6.2.3	Valores de pH en la salida del efluente con el compensador implementado.	65
Tabla A.1	Parámetros fluctuantes en el proceso de saneamiento de aguas residuales de Sigma Alimentos.	79
Tabla C.1	Especificaciones principales para la conexión Ethernet.	86

Capítulo 1: Introducción

El control automático corresponde a uno de los enfoques de la ingeniería en electrónica, cuyo objetivo consiste en implementar sistemas autocontrolados para mejorar la respuesta en el tiempo de los procesos, los cuales adquieren alto grado de autonomía al minimizar la injerencia del humano.

El objetivo de este proyecto consiste en mantener la variable de pH en un valor constante, lo que conlleva a evitar fluctuaciones en el fluido final que será vertido posteriormente a un río. Se presenta la forma de controlar dicha variable física mediante la implementación de un sistema de control automático continuo. La importancia de mantener un pH constante en dicho tanque reside en garantizar que el líquido efluente no perturbe la acidez de los suelos aledaños ni el lugar de vertido final, el cual la mayoría de las ocasiones son ríos.

Mediante una interfaz gráfica computacional, se visualiza el comportamiento en tiempo real de la variable de pH y adicionalmente presenta la distribución de sensores de otras variables físicas a mencionar: temperatura, flujo y oxígeno disuelto. Los ingenieros químicos requieren de la visualización de los valores de dichas variables para realizar estudios analíticos del comportamiento en zonas específicas de la planta de tratamiento de aguas residuales.

A continuación se presenta una breve descripción del problema existente y la solución a implementar.

1.1 Problema existente e importancia de solución

La planta de tratamiento de aguas residuales de Sigma Alimentos se ha diseñado como consecuencia de normativas jurídicas, las cuales propician la reducción del impacto ambiental principalmente en las aguas de sus vertederos y de los suelos aledaños.

El término afluente-efluente se refiere al transporte neto de sustancia de entrada y salida de la planta de tratamiento respectivamente. El tratamiento de las aguas residuales se compone de dos procesos: tratamiento primario en el cual se desgrasa el líquido afluente y se produce el lodo primario utilizado para la cría de ganado porcino. Por el contrario, en el tratamiento secundario se eliminan bacterias y se origina producto aprovechado como abono, llamado lodo secundario.

Sin embargo, en el líquido efluente se obtiene una fluctuación descontrolada de pH. Se determina que las variaciones más significativas de pH se producen al finalizar el tratamiento primario debido a la separación de la grasa del agua afluente.

Para Sigma Alimentos constituye una problemática dicha fluctuación en la salida del proceso ya que generan niveles de pH indeseados en el líquido final ya que los niveles de pH no cumplen con los estándares establecidos. Cabe destacar que diariamente el rango de las variaciones de pH sin controlador se encuentra entre aproximadamente 3 y 6.89, es decir, solamente niveles de pH ácidos.

De esta manera, el proyecto se enfoca a implementar un sistema de control automático que permita mantener un pH constante en la salida del tratamiento primario, y de esta manera garantizar un pH constante del líquido que ingresa al sistema de tratamiento secundario y así, evitar las fluctuaciones en la salida del efluente.

En la figura 1.1.1 se muestra un diagrama simple del proceso general. El líquido que ingresa a la planta de tratamiento es el afluente. Inicia el proceso de tratamiento primario con la eliminación de sólidos gruesos y finos y luego con la separación de grasa del producto. La etapa del tratamiento primario culmina con el control de pH propuesto, lo que implica que la entrada al sistema de control es el producto del fluido proveniente del desgrasado y eliminación de sólidos. Posteriormente, se inicia el proceso secundario en el cual se produce el lodo secundario y se logran las demás características que debe poseer el efluente.

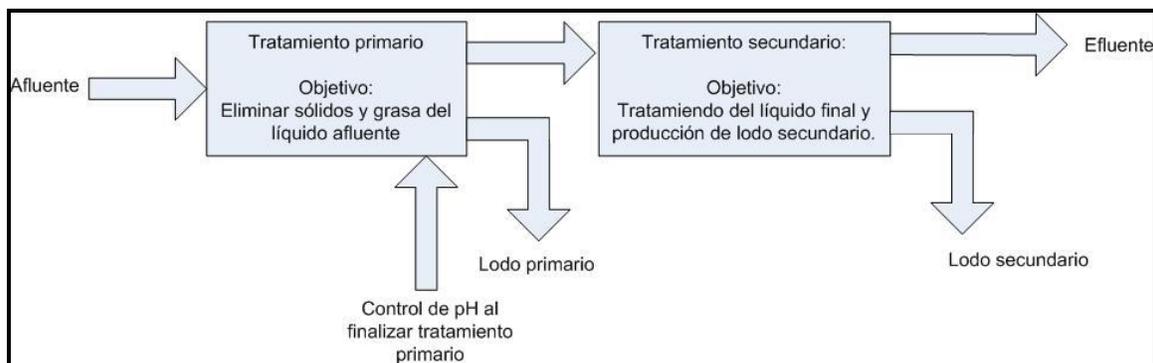


Figura 1.1.1 Diagrama simplificado del proceso de tratamiento de aguas residuales.

La importancia de obtener un nivel de pH constante en la salida del proceso radica en garantizar niveles de salubridad de las aguas para su posterior vertido en ríos.

Cabe destacar que este sistema de neutralización de pH a implementar, forma parte de un sistema de monitoreo de variables de oxígeno, flujo y temperatura a lo largo de la planta y que además controla el encendido y apagado de sopladores. El control automático del sistema de regulación de pH se introduce en este sistema computacional para minimizar costos de implementación en pantalla de operador.

1.2 Solución seleccionada

La empresa Sigma Alimentos necesita regular las fluctuaciones de pH en el efluente. El principal requerimiento consiste en minimizar el tiempo de estabilización del pH en la entrada del tratamiento secundario el cual inicia en el tanque de aireación. Además, para garantizar la estabilidad de pH en la salida final de la Planta de Tratamiento se consideran dos opciones:

- Neutralizar el pH solamente a la salida del proceso.
- Neutralizar el pH en la entrada del tratamiento secundario o tanque de aireación.

La primera solución posee el inconveniente de neutralizar el nivel de pH directamente en la salida, lo que puede implicar la alteración del nivel de concentración de otras propiedades que se deben garantizar tal como niveles de tensoactivos. Adicionalmente, posee la dificultad de instalación de sensores y equipos al final del proceso, el cual culmina a través de una salida de canal abierto. Además, posee el riesgo de verter al río dosificaciones de ácido y base en cantidades descontroladas en caso de que el sistema de control falle inesperadamente.

De esta manera, la segunda solución permite que las deficiencias mencionadas anteriormente sean minimizadas ya que el traspaso del líquido del tratamiento primario al secundario es mediante una canaleta de 8 pulgadas de diámetro y que en el tratamiento secundario se monitorizan variables que pueden ser corregidas en esta etapa.

Por tanto, el sistema de control de pH se implementó como la fase terminal del tratamiento primario y mediante un sistema de visualización computacional, de tipo SCADA, se pretende monitorizar el comportamiento en tiempo real del pH.

Mediante la dosificación de base se neutraliza la acidez del líquido afluente, y mediante sensores y un controlador PI se regula el nivel de pH. En la figura 1.2.1 se muestra un diagrama de bloques general del sistema de control implementado.

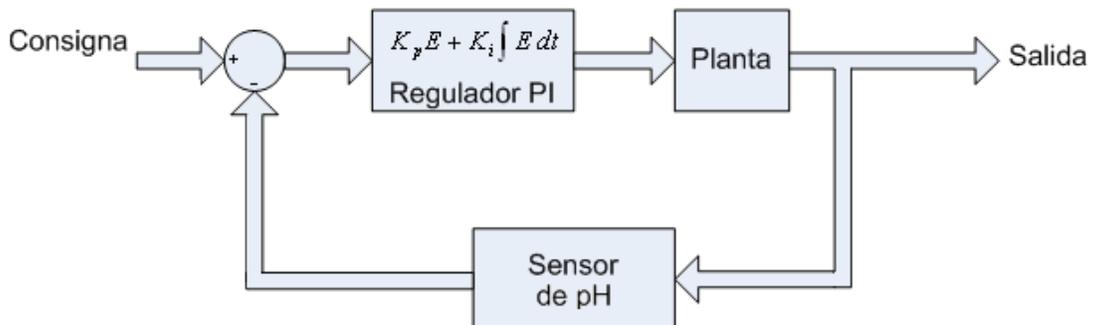


Figura 1.2.1 Diagrama de bloques general del sistema de control implementado

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

Proveer a Sigma Alimentos de un sistema de control automático que garantice un nivel de pH constante en la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Indicador: Obtener una gráfica que garantice que la salida de la Planta de Tratamiento permanece constante en el rango entre 6 y 8.5.

2.2 Objetivo general

Implementar un sistema de control automático continuo mediante la integración de dispositivos electrónicos que permitan mantener el nivel de pH constante en la entrada de tratamiento secundario.

Indicador: Obtener una curva en donde se muestre el comportamiento del sistema compensado a nivel real y teórico, donde los porcentajes de error sean menores a 5%.

2.3 Objetivos específicos

1. Obtener un modelo matemático del sistema a controlar, el cual posea constantes de PI similar al real en un 90% para interpretar las características de tipo dinámico y estático.

Indicador: Simulación en el software MATLAB, para obtener una similitud entre el modelo matemático y el modelo real en un 90% (valor recomendado por especialistas).

2. Seleccionar los equipos electrónicos para la integración de un sistema que permita mantener constante un nivel de pH específico en el rango de 6 y 8.5.

Indicador: Caracterización de los componentes para respaldar su funcionamiento dentro del sistema de control.

3. Implementar un regulador PI que permita compensar el sistema de lazo cerrado para obtener un sistema estable.

Indicador: Pruebas de campo que permitan la evaluación de la estabilidad del sistema en lazo cerrado.

Capítulo 3: Marco teórico

Las aguas residuales producidas en las industrias no deben ser desechadas sin un previo saneamiento debido a que producen contaminación de suelos y pueden causar efectos irreversibles en los suelos donde son evacuadas como la muerte de especies principalmente en ríos utilizados como depósito final de las mismas.

Esta medida la toman día con día mayor cantidad de industrias debido a la problemática ambiental y contaminación de aguas que acarrea la infertilidad de los suelos aledaños. Además, los gobiernos han logrado decretar legislaciones que en conjunto con la ingeniería ambiental acreditan estándares de calidad de dichas aguas para minimizar daños [3]

A continuación se describen los principales contaminantes existentes en el agua residual [11]:

- Sólidos en suspensión: Cuando sólidos en suspensión son vertidos en lechos y ríos, conducen al desarrollo del depósito de fangos y aumenta las condiciones llamadas anaerobias de la zona.
- Material orgánico biodegradable: la materia orgánica biodegradable se mide en términos de DBO y DQO. El vertido de aguas residuales con elevados DBO y DQO en el entorno acuático lleva al agotamiento del oxígeno en la zona.
- Material orgánica refractaria: este tipo de material orgánico interfiere en los métodos convencionales de tratamiento, por otra parte, pueden contaminar las aguas naturales de productos tóxicos, o según algunos estudios, incluso cancerígenos.
- Nutrientes: los principales nutrientes acuáticos son el nitrógeno, fósforo y carbón. Un agua residual que los contenga, y se vierta sin tratar, puede producir el crecimiento de vida acuática no deseada.
- Metales pesados: los metales pesados provienen generalmente de aguas residuales comerciales e industriales. Aunque algunos de estos metales son necesarios para el desarrollo de vida biológica, las concentraciones elevadas de estos pueden interferir en el proceso de depuración y podrían poner en peligro el aprovechamiento de aguas naturales dada su alta toxicidad.
- Compuestos tóxicos: estos compuestos tiene la misma problemática que los metales pesados, algunos ejemplos son: plata, cobre, boro, cianuro, cromatos, plomo y arsénico.

A grandes rasgos, el proceso de saneamiento de la planta de tratamiento de Sigma Alimentos consiste en dos etapas las cuales se realizan

consecutivamente: en la primera ocurre la separación de sólidos y grasa del líquido afluente y la segunda consta de la dosificación de líquidos y procesos anaeróbicos que permiten la separación de bacterias para obtener el líquido final.

De esta manera, la planta de tratamiento de Sigma Alimentos se ha dividido en dos zonas llamadas: tratamiento primario (Zona DAF) y tratamiento secundario (Zona Lodos). Los presentes apartados describen el sistema implementado y teoría necesaria de la variable de pH. Posteriormente, se toma el tema central del proyecto que consiste en la importancia del pH constante en la salida del tratamiento primario. En el Anexo A se presenta el proceso que toma el agua residual de Sigma Alimentos al ser tratada desde el inicio hasta ser vertida.

3.1 Descripción del sistema

Para lograr un nivel de pH constante al final del tratamiento primario se requiere de un reactor en el cual se logra homogenizar la solución mediante motores sopladores.

Adicionalmente, es necesaria la inyección de base (cuyo pH es igual a 12) puesto que la solución de entrada proveniente del proceso de desgrasado, posee carácter ácido. Esta inyección se realiza a través de una bomba dosificadora la cual permite adicionar base a la entrada mediante la apertura de una válvula de control ON/OFF.

Las señales de control se realizan desde un gabinete ubicado a pocos metros del tanque, el cual posee una capacidad de 1000.L Un sensor de pH proporciona el valor de pH que llevará el fluido homogéneo hacia el tratamiento secundario. En la figura 3.1.1 se muestra un diagrama de bloques del sistema implementado para el control del pH constante.

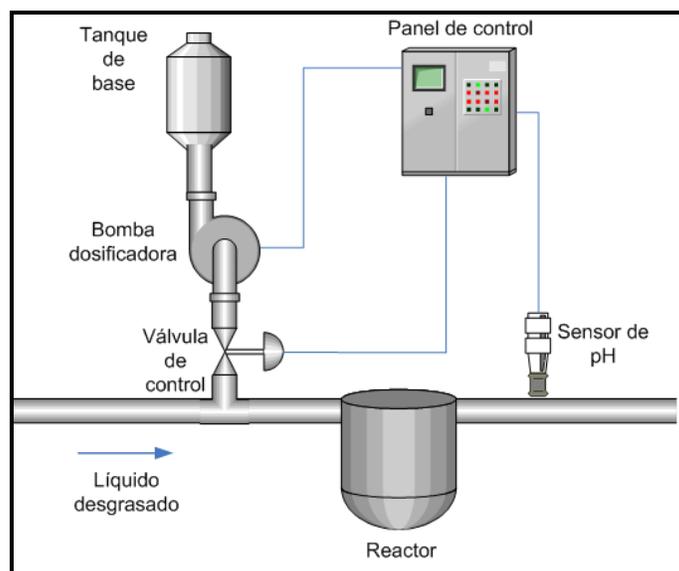


Figura 3.1.1 Diagrama de bloques del sistema implementado.

3.2 Antecedentes bibliográficos

El sistema implementado se diseñó mediante los principios del control automático. En este apartado se hace referencia a los principales temas relacionados con la solución del problema propuesto

3.2.1 Escala de pH

La medida de pH indica el grado de acidez o de alcalinidad de una sustancia específica. Todas las sustancias pueden clasificarse en un rango de 0 a 14 en esta escala.

Si una sustancia posee un pH de 7 es considerada como sustancia neutra ya que se encuentra en el centro de la escala. Se considera que esta medida es el sistema de referencia de dicha escala. Este valor neutro no es arbitrario sino que corresponde al valor absoluto del producto iónico de agua purificada a 25°C. [9]

Para valores menores de pH igual a 7 corresponden a sustancias ácidas, mientras que si poseen valores mayores se consideran sustancias básicas. A continuación se presenta la escala de pH para valores cercanos a un pH de 7, y se esboza el comportamiento logarítmico.

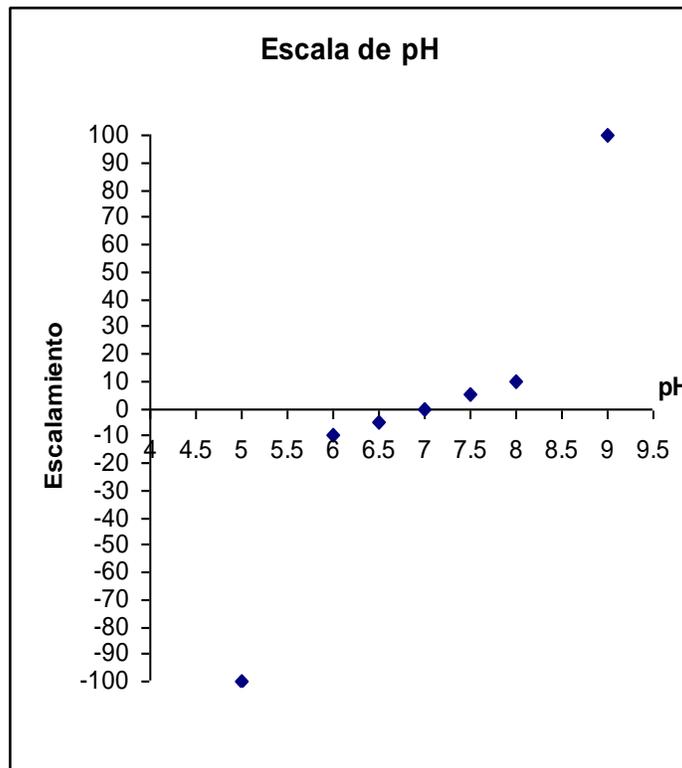


Figura 3.2.1 Escala de pH para valores cercanos al valor neutro.

Esta escala conserva un comportamiento logarítmico con respecto al número de concentración de iones de Hidrógeno, de la siguiente manera:

$$pH = -\log [H^+] \quad (3.2.1)$$

Debido a este comportamiento, cada diferencia de una unidad en la escala de pH corresponde a 10 veces el grado de acidez o alcalinidad. Así por ejemplo, si una sustancia posee un valor de pH igual 6, esta sustancia es 10 veces más ácida que una sustancia con un pH neutro.

3.2.2 Neutralización de pH

La neutralización de un fluido ácido es un proceso de ajuste de la variable de pH mediante la adición de una base (tal como la soda cáustica utilizada en nuestro sistema debido a su bajo costo) para obtener un rango de pH cercano a 7.0.

Por recomendaciones de especialistas se ha recomendado un pH constante de 8 debido a que es una empresa que produce queso y yogurt, lo que implica que el fluido entrante sea ácido. La adición de base generará valores de pH cada vez mayores hasta lograr alcanzar valores mayores a 7. La neutralización es utilizada para proteger fuentes receptoras de descargas alcalinas o ácidas fuertes, o para permitir el postratamiento de dichos residuos. [10]

Las normas de vertimiento requieren valores en el rango entre 6 y 8.5, de esta manera, este procedimiento constituye un proceso de pretratamiento en muchos residuos industriales.

En la tabla 3.2.1 se muestra el tipo de aguas que generan diferentes industrias. Estos datos permiten diagnosticar la clase de efluente que generan las compañías y pronosticar el prototipo de control de pH que se debe implementar para lograr la neutralización.

Cabe destacar, que para la implementación de control de pH para industrias generadoras de vertidos tanto de carácter básico como ácido, se hace necesario la adición de base cuando la planta suministra fluido ácido y viceversa. Esta neutralización requiere en este sentido de dos bombas dosificadoras en este caso.

Tabla 3.2.1 Tipo de aguas residuales que generan ciertas industrias de proceso.

Industria	Aguas residuales ácidas	Aguas residuales básicas
Derivados de la leche	X	
Aluminio	X	
Bebidas carbonatadas		X
Bronce y cobre	X	X
Café	X	
Caucho	X	X
Cervecería y destilería	X	X
Drenaje de minas de carbón	X	
Energía	X	X
Enlatados	X	X
Farmacéuticos	X	X
Fosfatos	X	
Hierro y acero	X	
Lavanderías comerciales		X
Limpieza de metales	X	
Papel	X	X
Plantas químicas	X	X
Refinerías de petróleo	X	X
Textiles	X	X

La neutralización supone la reacción con iones hidrógeno o hidróxidos activos, para formar aguas y sales neutras. Existen ácidos y bases fuertes o débiles [7]. Un ácido fuerte tiene prácticamente todos sus iones H^+ libres en solución. Los ácidos débiles no se disocian completamente y al permanecer unidos mediante enlaces de poca fuerza de cohesión se llaman débiles. Sin embargo, dos ácidos de concentración normal igual tienen la misma acidez total y requieren la misma cantidad de base para su neutralización, es decir, poseen igual capacidad de neutralizar un alcalino o base. En la tabla 3.2.2 se ilustran varios ejemplos de sustancias características a cierta acidez [5].

Tabla 3.2.2 Ejemplos de sustancias a diferentes niveles de pH

pH	Sustancia característica
0	H_2SO_4 – 4.9%
1	H_2SO_4 – 0.49%
2	Jugo de limón
3	Ácido acético al 0.6%
4	Jugo de naranja
5	Cerveza
6	Queso - Leche
7	Agua pura
8	Bicarbonato de sodio al 0.84%
9	Bórax – Leche de magnesio
10	Amoniaco al 0.017%
11	Amoniaco al 1.7%
12	Soda cáustica 0.04%
13	Soda cáustica 0.4%
14	Soda cáustica 4%

La neutralización de aguas ácidas se realiza mediante la dosificación de base agregando Cal, óxido de Cal, óxido o Hidróxido de magnesio. La Cal, óxido de Cal y soda cáustica son las más utilizadas como aditivo para neutralizar agua ácida.

3.2.3 Mecanismo de control de pH

Actualmente la ingeniería química ha permitido establecer cuatro mecanismos estándar para el control de la variable de pH. A continuación se detalla cada uno de ellos [10]:

3.2.3.1. Proceso por lotes.

3.2.3.2. Proceso de tanque continuo.

3.2.3.3. Proceso de Canal o Tanques consecutivos.

3.2.3.4. Control predictivo.

3.2.3.1 Proceso por lotes:

Este proceso se caracteriza por controladores ON/OFF mediante relevadores. Consiste en un proceso secuencial de tres etapas claramente definidas como se listan a continuación:

- a. Bombeo de la solución a controlar hasta llenar un tanque.
- b. Para iniciar la preparación de la mezcla, se adiciona la sustancia química dosificadora (en nuestro caso base) y se controlan los tiempos de suministro en ciclos ON/OFF.
- c. Se desocupa el tanque con el pH deseado en la solución.

De esta manera, se produce el primer lote. Seguidamente se da paso mediante la válvula a otro lote de producto de entrada, se neutraliza y se da paso al tercer lote y así sucesivamente. Este proceso presenta inconvenientes de implementación debido a que en ocasiones el nivel de pH fluctúa dependiente de la altura en el tanque. Cuando esto ocurre se debe de repetir el ciclo, lo que implica retardos significativos que implican acumulaciones en la entrada al tanque, situación que no está diseñada ya que el flujo de entrada es continuo.

Debido a este escenario se debe de modificar los tiempos de ON/OFF, se utilizan tiempos prolongados y bajo flujo de entrada, sin embargo en la Planta de Tratamiento de Sigma el caudal de afluente oscila de 0 a 20 litros por segundo.

En la figura 3.2.2 se esboza un diagrama del proceso para aclarar los pormenores.

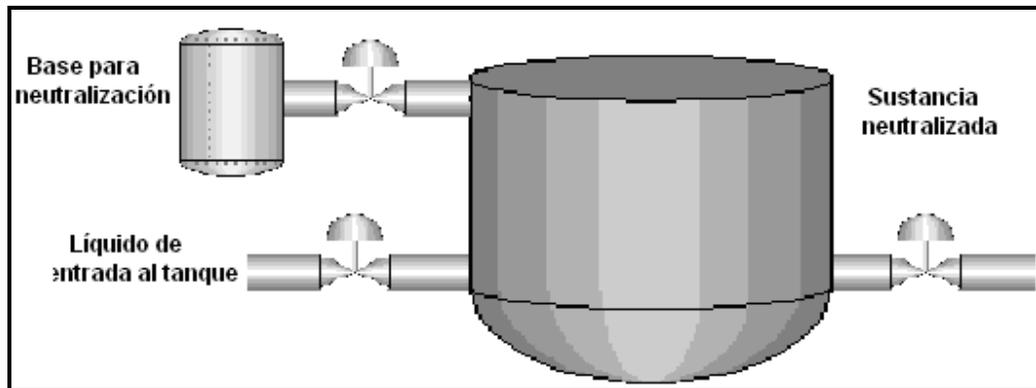


Figura 3.2.2 Control por lotes para la variable de pH

3.2.3.2 Proceso por tanque continuo:

Este proceso consta de una bomba que dosifica proporcionalmente regulada por un control analógico, el cual permite regular la dosificación gradual de la misma mediante un microcontrolador. Este sistema consiste en cinco pasos:

1. El valor de pH es sensado en el efluente del tanque.
2. El sensor toma el valor y lo convierte a una diferencia de potencial.
3. Un transmisor codifica esta señal para enviarla en voltaje o corriente analógica.
4. La bomba dosificadora toma el valor de la señal del punto 3 y actúa con la misma.
5. La mezcla se prepara con un tiempo de retraso.

Este proceso es más confiable que el anterior, sin embargo la buena mezcla de disolución es el indicador para hacer efectivo el proceso. La cantidad de sustancia básica a dosificar versus la cantidad de ácido ingresado no es lineal. Se recomienda su uso para tiempos de retención de líquido en el tanque menores a 3.5 minutos (controlado a partir de la regulación que provee la válvula de entrada) tal y como sucede en Sigma Alimentos. En la figura siguiente se realiza un bosquejo del proceso.

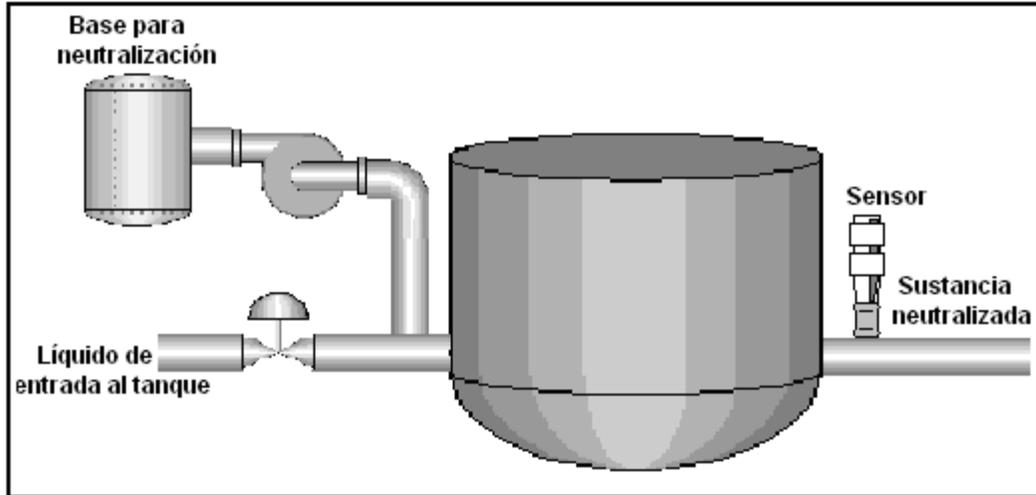


Figura 3.2.3 Control por tanque continuo para la variable de pH

3.2.3.3 Proceso de Canal o Tanques consecutivos

En este proceso el tiempo de ON/OFF de una válvula proporcional es controlado a partir de un controlador análogo medido por sensores distribuidos en el proceso. Para garantizar la mezcla se utiliza un solo canal conformado por tanques colocados estratégicamente para el que el fluido se traslade a través de ellos en forma consecutiva (ver figura 3.2.4). La primera etapa se caracteriza por una mezcla rápida intensa, y la siguiente la mezcla ya no es un factor determinante. El tiempo de ON/OFF de la válvula es menor que el tiempo de retardo definido como el tiempo entre la mezcla y el punto de medida, es decir, el sistema de control actúa más rápido que el tiempo de traslado de fluido a través de los tanques. De esta manera se genera un pH constante.

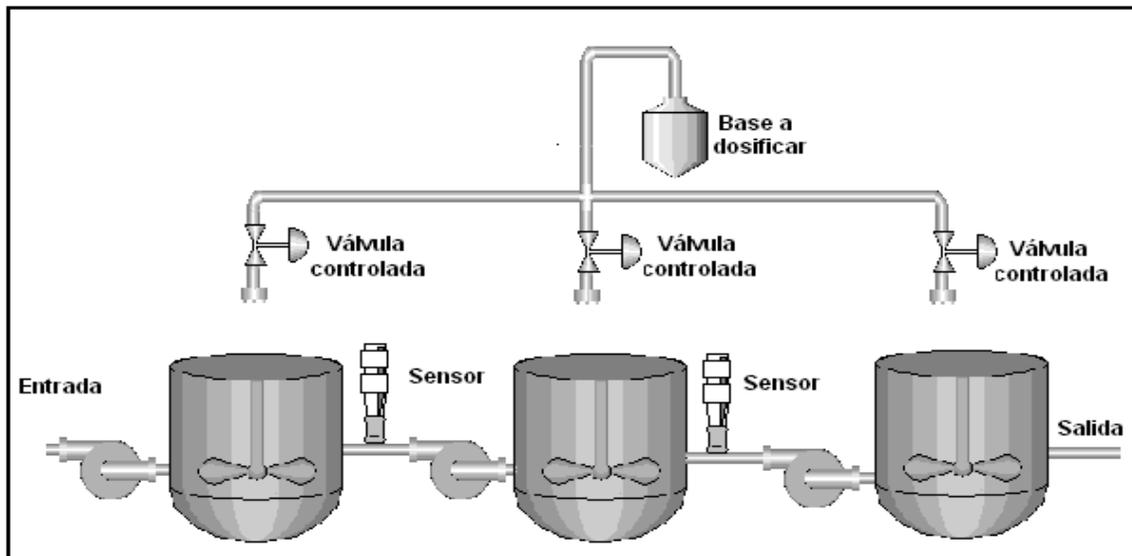


Figura 3.2.4 Control por proceso de canal o tanque continuo.

3.2.3.4 Control predictivo

El control predictivo es utilizado en la situación especial en la cual, tanto el flujo de entrada como los niveles de pH de salida cambian repentina y frecuentemente en el tiempo. De esta manera, se utiliza el caudal de entrada o el pH como variable de cambio y control de la dosis de aditivo neutralizante, sin esperar que el reactor experimente cambios significativos de pH.

Este tipo de control es predictivo y necesita un conocimiento completo de la planta y práctica sobre ella, lo cual conlleva a más tiempo de implementación que los sistemas mencionados anteriormente.

3.2.4 Tipos de reactores

Si un fluido contiene un componente no distribuido homogéneamente, o sea, existe un gradiente de concentración, actúan sobre él fuerzas naturales para transferir masa y minimizar las diferencias de concentración. La difusión, transporte o distribución de un componente en un medio son ejemplos típicos de transporte de masa. El tiempo requerido para que una sustancia se distribuya homogéneamente en un sistema de tratamiento de aguas puede ser variable. A continuación se presentan dos métodos para controlar el tiempo de homogenización:

- a. Transporte conectivo de masas: existe una mezcla en el sistema, de este modo las características del flujo hacen que los gradientes de concentración disminuyan sustancialmente y de forma rápida. En el caso de Sigma Alimentos existen motores sopladores que se encargan de agitar la mezcla luego de ser neutralizada.
- b. Tratamiento molecular: el sistema se encuentra en reposo, el mecanismo de transferencia de masa es el movimiento aleatorio propio de las moléculas.

El término generación se refiere a la destrucción o generación debida a la reacción o proceso dentro del reactor, y el término acumulación se refiere directamente al residuo dentro del reactor.

Los distintos tipos de reactores se detallan a continuación [14]:

3.2.4.1 Reactor de cochada de mezcla completa.

Este tipo de reactor se caracteriza por la inexistencia de afluente y efluente con existencia de mezcla completa del contenido del tanque. Es un reactor con dispersión infinita. La mezcla hace que la concentración de reactantes y productos sea totalmente homogénea en todo el reactor. Este tipo de reactores se emplea en el proceso por lotes y es mostrado en la siguiente figura.

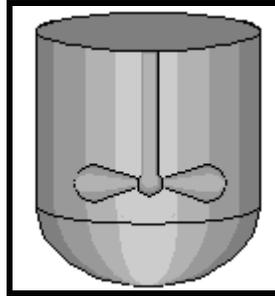


Figura 3.2.5 Reactor de cochada de mezcla completa

3.2.4.2 Reactor de flujo continuo y mezcla completa

Posee un tanque cilíndrico o cuadrado con agitador mecánico, las partículas presentes en el fluido del afluente se dispersan de inmediato dentro del tanque, haciendo que abandonen el tanque y permitiendo suponer que el contenido del reactor es homogéneo e igual al del efluente. Es el más utilizado por su fácil modelo e implementación.

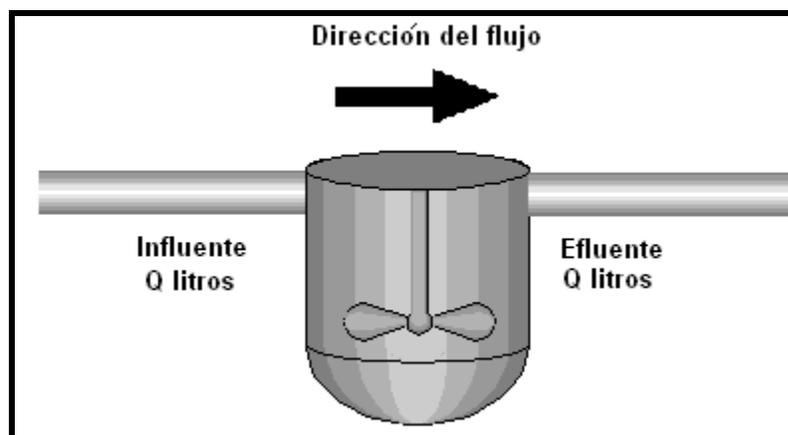


Figura 3.2.6 Reactor de flujo continuo y mezcla completa.

3.2.4.3 Reactor de flujo de pistón.

Es llamado de flujo tubular, es un reactor ideal. En él las partículas de fluido viajan a lo largo del reactor sin mezclas entre sí y por tanto se descargan en la misma secuencia y orden en la que entran al reactor. Los elementos del sistema viajan a una misma velocidad, las partículas retienen sus características y permanecen en el tanque durante un tiempo igual al tiempo de retención. Se utilizan en tanque largos de una relación longitud/ancho grande. En la práctica es imposible impedir la mezcla entre las partículas de fluido o paquetes ya que siempre existe una mezcla longitudinal.

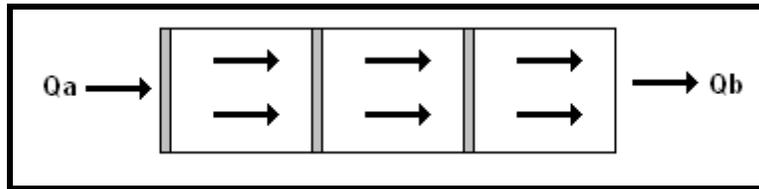


Figura 3.2.7 Reactor de flujo de pistón.

3.3 Descripción de los principales principios físicos relacionados y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.

A continuación se presentan secciones correspondientes a la explicación de los métodos de control automático y las bases que fundamentan el diseño del controlador PI utilizado para controlar la variable pH.

3.3.1 Conceptos para el análisis de la respuesta al escalón.

Según Kuo [4], la fracción transitoria de la respuesta en el tiempo es aquella parte que tiende a cero cuando el tiempo crece. El objetivo es garantizar que tanto la amplitud como la duración del tiempo en la respuesta transitoria, deben mantenerse dentro de los límites establecidos.

Para encontrar las propiedades de la respuesta transitoria normalmente se realiza ante una función al escalón como entrada al sistema. Tomando como referencia esta señal, la premisa utilizada como criterio de desempeño para la caracterización de sistemas de control lineal en el dominio del tiempo se definen a continuación:

- **Sobrepaso máximo.** Se asume que $y(t)$ es la respuesta del sistema a la entrada escalón. Además, y_{MAX} es el valor máximo de $y(t)$ y y_{SS} es el valor en estado estable, entonces el sobrepaso máximo (M) se define como:

$$M = y_{MAX} - y_{SS} \quad (3.3.1)$$

- **Tiempo de retardo:** Se refiere al tiempo de retardo t_D es el tiempo requerido para que la respuesta al escalón alcance el 50% de su valor final.
- **Tiempo de levantamiento:** se define al tiempo requerido t_R para que la respuesta al escalón se eleve del 10% al 90% de su valor final.
- **Tiempo de asentamiento:** Se refiere al tiempo t_S para que la respuesta al escalón disminuya y permanezca dentro de un porcentaje específico de su valor final, por lo general se utiliza el 5%.

Las cuatro especificaciones definidas, dan una medida directa de las características transitorias (estado dinámico) de un sistema de control en términos de la respuesta a la entrada escalón. En la figura 3.3.1 se muestra una respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón. Como se puede apreciar, estas especificaciones de dominio en el tiempo son relativamente fáciles de medir.

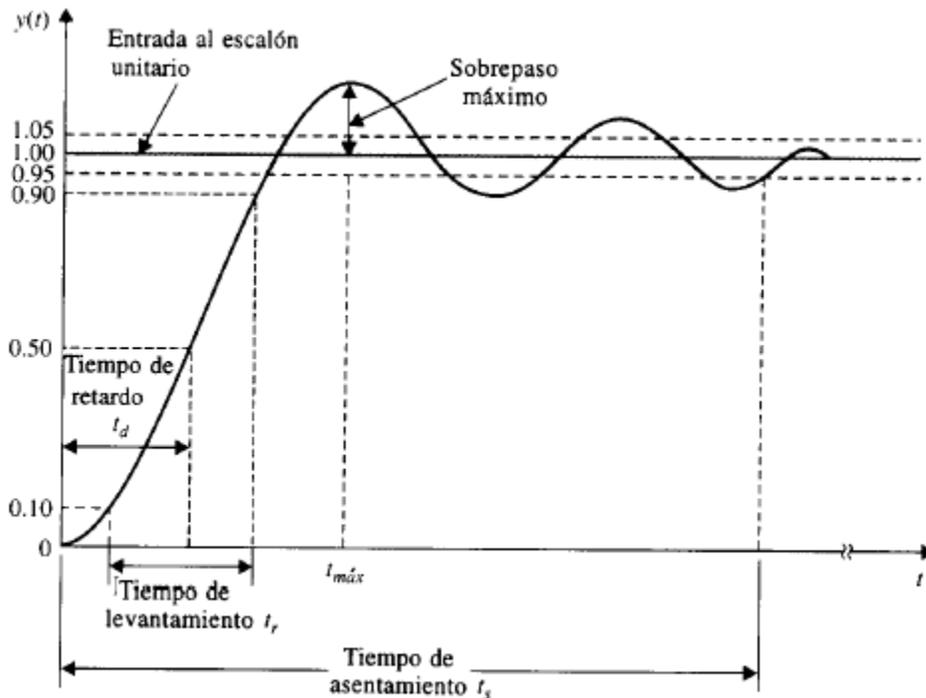


Figura 3.3.1 Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón unitario [4]

3.3.2 Estabilidad de un sistema según el criterio de Routh-Hurwitz

Existen diversos métodos para garantizar la estabilidad de un sistema [13]. Un método directo consiste en descomponer en factores el denominador de la función de transferencia en lazo cerrado $Y(s)/R(s)$. Una vez que se conocen todas las raíces, es fácil descubrir si todos los polos se encuentran en el semiplano izquierdo del eje $j\omega$. Sin embargo, la descomposición del denominador en factores puede resultar complicada o imposible si se consideran literales como coeficientes. Ciertamente, el procedimiento de descomposición en factores brinda mayor información de la que verdaderamente se necesita para garantizar la estabilidad del sistema.

No se necesita saber la exacta ubicación de cada uno de los polos del sistema, pero sí que se encuentra en el semiplano izquierdo. Afortunadamente, existen métodos alternativos que permiten obtener más fácilmente esa incógnita de estabilidad. Uno de ellos es el criterio de Routh-Hurwitz. Este procedimiento está basado en pruebas algebraicas sobre los coeficientes del polinomio del denominador de $Y(s)/R(s)$ llamada ecuación característica.

Al determinar la ecuación característica de una planta se debe examinar los coeficientes del polinomio para asegurar lo siguiente:

1. Todos los coeficientes de la ecuación característica deben estar presentes.
2. Todos los coeficientes deben ser positivos.

Para que un polinomio posea todos sus polos en el semiplano izquierdo es necesario pero no suficiente que pase la prueba de inspección inicial. Es decir, si el polinomio característico no satisface una de las dos condiciones, se puede concluir que el polinomio tiene al menos una raíz que no se encuentra en el semiplano izquierdo, y por lo tanto, el sistema a lazo cerrado será inestable.

Por otro lado, si el polinomio satisface ambas condiciones no se puede llegar a ninguna conclusión de estabilidad. Por ejemplo, considérese el polinomio de tercer grado:

$$D(s) = s^3 + 0.5s^2 + 3.5s + 4$$

A pesar de que este polinomio satisface las dos condiciones anteriores, tiene dos raíces en el semiplano derecho, por tanto inestable a lazo cerrado. Sin embargo, estas dos condiciones juegan un papel muy importante en el análisis de la estabilidad. No obstante, es un gran porcentaje de casos, el polinomio satisface ambas condiciones. En este caso se puede utilizar el criterio de Routh-Hurwitz, el cual se presenta a continuación.

3.3.2.1 Criterio de Routh-Hurwitz

El primer paso para utilizar este criterio es la formación de un arreglo de números basado en los coeficientes del polinomio del denominador. Dicho arreglo se denomina el arreglo de Routh y se forma de la siguiente manera:

s^n	$\delta_{01} = 1$	$\delta_{02} = d_{n-2}$	$\delta_{03} = d_{n-4}$...
s^{n-1}	$\delta_{11} = d_{n-1}$	$\delta_{02} = d_{n-3}$	$\delta_{13} = d_{n-5}$...
s^{n-2}	δ_{21}	δ_{22}	δ_{23}	...
.
.
.
s^1	$\delta_{n-1,1}$	0	0	...
s^0	δ_{n1}			
Columna pivote				

Donde:

$$\delta_{ij} = \frac{\delta_{i-1,1}\delta_{i-2,j+1} - \delta_{i-2,1}\delta_{i-1,j+1}}{\delta_{i-1,1}} \quad i = 2,3,\dots, n \quad j = 1,2,\dots \quad (3.3.2)$$

A la primera columna del arreglo de Routh se le denomina columna pivote. Los dos primeros renglones del arreglo se forman al escribir simplemente los coeficientes de $D(s)$ en orden de potencias decrecientes de s de manera alterna en el primer y segundo renglón. Los renglones restantes del arreglo se forman consecutivamente al usar la ecuación 3.3.2. Nótese que el cálculo de los elementos restantes siempre implica los dos elementos en la columna pivote de los dos renglones precedentes. Su cálculo es parecido al cálculo del determinante pero de signos contrarios.

El criterio de Routh Hurwitz se puede postular de la siguiente manera:

“El polinomio característico $D(s)$ tiene raíces sobre el eje $j\omega$ o en el semiplano derecho del plano s si hay ceros o cambios de signo en la columna pivote del arreglo del Routh.”

Por supuesto, si el polinomio característico de la planta tiene raíces sobre el eje $j\omega$ o en el semiplano derecho, implica que el sistema es inestable a lazo cerrado.

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

En el presente capítulo se especifican las normas seguidas para el diseño de una solución que cumpliera con los requerimientos de la Planta de Tratamiento de Sigma Alimentos.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Las pruebas de campo realizadas para la medición de pH en el efluente de la Planta de Tratamiento vislumbraron una fluctuación importante en los niveles del mismo, lo cual no es deseable. Mediante entrevistas con los ingenieros químicos, encargados de la calidad del líquido en Sigma Alimentos se acuerda en controlar este parámetro en forma automática de tal modo que la variación en los niveles de pH sea mínima y establecida en un punto cercano al pH neutro.

La manera de controlarlo a partir de sustancia base, se especificó mediante las recomendaciones del Ing. Daniel Baudrid especialista en Plantas de Tratamiento. De esta forma, se propuso un sistema de control que permita la regulación de dicha variable. Sin embargo, por el criterio del especialista se define que el pH puede ser establecido en un rango cercano al pH neutro, es decir, cercano a 7. De esta manera se ha establecido que el pH sea de 8 para que la sustancia no sufra de variaciones entre características ácidas y básicas tal y como sucedería si se establece la referencia en pH igual a 7.

Además para verificar dicho control se propuso un sistema de monitorización que permita visualizar las lecturas de los sensores de pH. Adicionalmente, este sistema permite visualizar otras variables como el caudal de flujo, oxígeno y temperatura, así como de su comportamiento en tiempo real.

4.2 Obtención y análisis de información

La forma de implementación de los reguladores se ha obtenido mediante la teoría de control automático propuesta en los libros de texto tales como Sistemas de Control Moderno de Benjamín Kúo. Las entrevistas fueron de gran importancia en el desarrollo del proyecto ya que establecieron los alcances y las limitaciones del mismo.

El uso de Internet se hizo efectivo en la obtención de las hojas de datos de los sensores, bomba dosificadora, válvulas, PLC y sus módulos de entradas y salidas analógicas. Asimismo, se obtuvo la información concerniente a los tutoriales para la programación de los PLC's y de la interfaz gráfica mediante un sistema SCADA con el programa RSView32 de la compañía Allen Bradley.

La información se seleccionó con base en los principios físicos que gobiernan el sistema a regular. Se pretende que el desempeño del sistema sea más importante que el costo. De esta manera, se estudiaron diferentes opciones del equipo a utilizar y se escogió aquel que posee mayores atributos y facilidades de control con el fin de prever algún tipo de ampliación de control.

El diseño del compensador se realizó mediante simulaciones utilizando el software MATLAB y su herramienta Simulink. Esto permitió obtener una aproximación del sistema real.

Se realizaron pruebas en campo con el controlador programado en la lógica del PLC. Seguidamente, se grafica el comportamiento real y teórico en una sola curva para analizar los porcentajes de error del sistema teórico versus el real.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Múltiples aplicaciones industriales requieren del control a partir de compensadores de tipo PID para la solución de diversos requerimientos de regulación, debido a su sencillez y robustez que hace posible que el sistema adquiera poca sensibilidad a perturbaciones externas y de esta manera brinda gran estabilidad al sistema.

Por otro lado, los controladores lógicos programables (PLC) son dispositivos que presentan gran versatilidad en el campo del control industrial y de procesos ya que vienen provistos con etapas de interfase de potencia, protocolos de comunicación estándar y posibilidad de ampliación del sistema una vez ya implementado, entre otras. Por estas razones se seleccionó un controlador lógico programable para implementar el controlador PID que permitiera obtener un pH constante.

El modelo matemático se obtuvo de forma analítica. Mediante las ecuaciones correspondientes de concentración molar versus pH, se logra obtener en forma simulada la respuesta esperada sin controlador. Es decir, se obtuvo la respuesta del sistema ante una perturbación y se verifica que es un sistema de primer orden.

En los sistemas de primer orden, por lo general se utiliza un compensador de tipo PI para diseñar los parámetros de respuesta dinámica del sistema, tales como tiempos de subida, tiempo de estabilización, sobreimpulso entre otros.

Una vez obtenido el modelo matemático y debidamente validado, se procedió con el diseño del controlador a implementar. En el diseño de este controlador se utilizó la técnica de igualación de la ecuación característica. De esta manera, se obtienen los parámetros de constante proporcional e integral a través del método de estabilidad de Routh-Hurwitz.

De acuerdo a las especificaciones obtenidas de la planta, se estableció mejorar las características dinámicas de la respuesta transitoria con el fin de tener un sistema más rápido, (tiempo de levantamiento y tiempo de asentamiento menores), y con menos sobrepaso. Para esto se establecieron valores de tiempo y de sobreimpulso máximo.

De esta manera, se logra obtener una ecuación característica y teórica y que permite introducir las constantes en el PLC. El implementar el controlador, se obtuvo mediciones en tiempo real que permiten dar validez al modelo implementado, ya que los porcentajes de error son bajos.

4.4 Reevaluación y rediseño

Una de las formas alternativas de diseño del controlador, es utilizar la respuesta al escalón de la planta. Con esto, se obtiene una gráfica de primer orden con los parámetros en el dominio del tiempo: tiempo de subida, tiempo de asentamiento, sobreimpulso y tiempo de estabilización.

A partir de estos datos, se diseña el compensador PID implementado en un PLC para mejorar los parámetros mencionados a criterio del diseñador del sistema. Este método es efectivo cuando el diseño analítico se vuelve complejo.

Por otro lado, existe otro mecanismo de sintonización de los parámetros PID, a través del método de Ziegler-Nichols. Es útil cuando la planta a controlar sea lo suficientemente estable como para experimentar con ella. Una de las ventajas de este método es que la sintonía de los parámetros PID se realiza en un tiempo relativamente corto y sin necesidad de obtener el modelado matemático. Sin embargo no siempre es efectivo y no se cuenta con la versatilidad de controlar las características dinámicas del sistema.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución final

En este capítulo se describe el detalle de la solución final propuesta. Se inicia con la deducción teórica para el modelado de la planta. Adicionalmente, se describe el hardware utilizado para la implementación de control, así como el software usado para llevar a cabo el control de los dispositivos electrónicos.

5.1 Modelado de la planta

Al desarrollar el modelo de la planta, se debe definir el tipo de control que se utilizará. Al observar la implementación que posee Sigma Alimentos, se ha escogido el modelo de control continuo a través de una bomba dosificadora de base. Se toma como referencia el reactor como de mezcla completa para el diseño de la planta.

5.1.1 Modelo del reactor

Para el modelo del reactor no interesa el tipo de mezclador que se utilice. Debido a que la diferencia radica solamente en el tiempo para que se estabilice la solución. Este tiempo es llamado tiempo muerto y se agrega la diferencia como $e^{-t_o s}$ [1]. Este retardo se puede proporcionar al modelo del reactor debido a que los sensores están ubicados a una distancia mayor a la salida del reactor. El sensor es ubicado en la entrada al tratamiento secundario o al inicio del tanque de aireación. En la figura siguiente se muestra un esquemático del sistema a controlar con las respectivas variables mencionadas anteriormente:

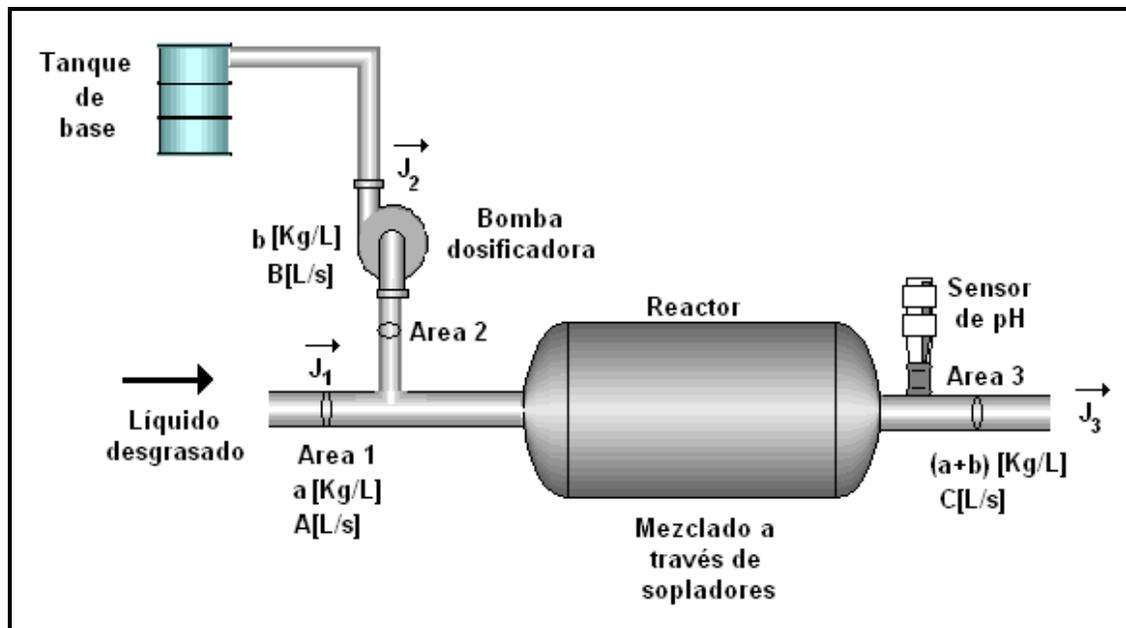


Figura 5.1.1 Modelo físico del sistema a analizar.

De esta manera, se recurre a la ecuación del equilibrio de masa, la cual se interpreta como:

“La pérdida de flujo es igual a la acumulación de flujo más la salida sustrayendo la suma de entradas del afluente y sustancia de neutralización”, en la ecuación 5.1.1 se muestra dicha ecuación [8]:

$$cV = V \frac{dy}{dt} + J_3 Area_3 - J_1 Area_1 - J_2 Area_2 \quad (5.1.1)$$

Donde:

V: Volumen total del reactor en litros (L).

c: pérdida de materia por transferencia de calor. En nuestro caso es cero.

J_k : se refiere al flujo másico en Kilogramos por metro cuadrado por segundo $[\frac{Kg}{m^2 s}]$

$\frac{\partial y}{\partial t}$: Acumulación o diferencia entre entrada y salida del sistema $[\frac{Kg}{L s}]$

A: Caudal de la entrada o afluente. [L/s]

B: Caudal de la solución básica o dosificada. [L/s]

a: Concentración del afluente [Kg/L]

b: Concentración de la solución básica [Kg/L]

Debido a que se omiten pérdidas por calor, se tiene que:

$$0 = V \frac{dy}{dt} + J_3 A_3 - J_1 A_1 - J_2 A_2 \quad (5.1.2)$$

Además se tiene por comparación de unidades:

$$J_1 A_1 = A a \quad (5.1.3)$$

$$J_2 A_2 = B b \quad (5.1.4)$$

$$J_3 A_3 = (A + B) y \quad (5.1.5)$$

Sustituyendo (5.1.3), (5.1.4) y (5.1.5) en (5.1.2), se tiene que:

$$0 = V \frac{dy}{dt} + (A + B)y - Aa - Bb$$

Dividiendo a ambos lados por A y mediante arreglos matemáticos se tiene:

$$\frac{dy}{dt} \frac{V}{A} = a + \frac{Bb}{A} - y - \frac{B}{A} y$$

Analizando el último término de la ecuación anterior; se puede despreciar debido a que la variación de la concentración fluctúa en función del flujo de entrada A y el aporte del caudal de base es bajo, entonces: $\lim_{A \rightarrow \infty} \left(\frac{B \cdot y}{A} \right) \approx 0$

De esta manera se reduce la ecuación a:

$$\frac{dy}{dt} \frac{V}{A} = a + \frac{Bb}{A} - y$$

Aplicando Laplace a ambos lados de la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} \frac{V}{A} * Y * s &= a + \frac{Bb}{A} - Y \\ Y \left(\frac{V}{A} s + 1 \right) &= a + \frac{Bb}{A} \\ \frac{Y}{a + \frac{B \cdot b}{A}} &= \frac{1}{\frac{V}{A} s + 1} \end{aligned} \quad (5.1.6)$$

La cual se constituye en la función de transferencia de la planta. En la figura 5.1.2 se muestra el diagrama de bloques de dicha función de transferencia.

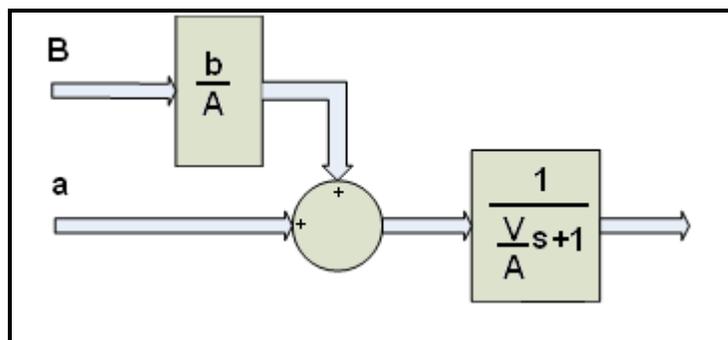


Figura 5.1.2 Diagrama de bloques de la función de transferencia de la ecuación 5.1.6.

5.1.2 Modelo químico del concentrado iónico del afluente

Con esta denominación se está haciendo referencia a la concentración de la salida del sistema “y”. El objetivo de este apartado es lograr hallar una ecuación que relacione los términos de concentración iónica y el pH de entrada del afluente, es decir: $y(pH)$ [10].

La ecuación del equilibrio iónico se refiere a [2]:

$$y = |H^+| - |OH^-| \quad (5.1.7)$$

Donde:

H^+ : iones de Hidrógeno.

OH^- iones de Hidroxilo.

Ahora bien, se pretende poner los términos de la derecha de la ecuación (5.1.7) en función de la variable pH.

Como se detalla en la sección 3.2 el $pH = -\log(H^+)$, y despejando H^+ :

$$H^+ = 10^{-pH} \quad (5.1.8)$$

Se requiere una relación que vincule los iones Hidroxilo con la variable de pH. Precisamente, la relación que permite este vínculo es la ecuación del producto iónico del agua [9], la cual se describe a continuación:

$$[H^+][OH^-] = K \quad \text{donde } K \approx 10^{-14}$$

Y despejando $[OH^-]$:

$$[OH^-] = K * 10^{pH} \quad (5.1.9)$$

Sustituyendo estos dos resultados en (5.1.7), se logra una relación que vincule la salida del sistema con respecto al pH de la sustancia afluente.

$$\begin{aligned} y &= 10^{-pH} - K * 10^{pH} \\ y &= 10^{-pH} - 10^{(pH-14)} \end{aligned} \quad (5.1.10)$$

5.1.3 Linealización

Nótese que la salida de la función de transferencia posee unidades de (Kg/L), de esta manera se requiere una transformación de esta unidad a nivel de pH. Es por este motivo que se realiza una linealización del mismo para obtener los mejores resultados en la implementación del controlador. A continuación se presenta la curva original inversa que muestra la curva obtenida para la ecuación (5.1.10).

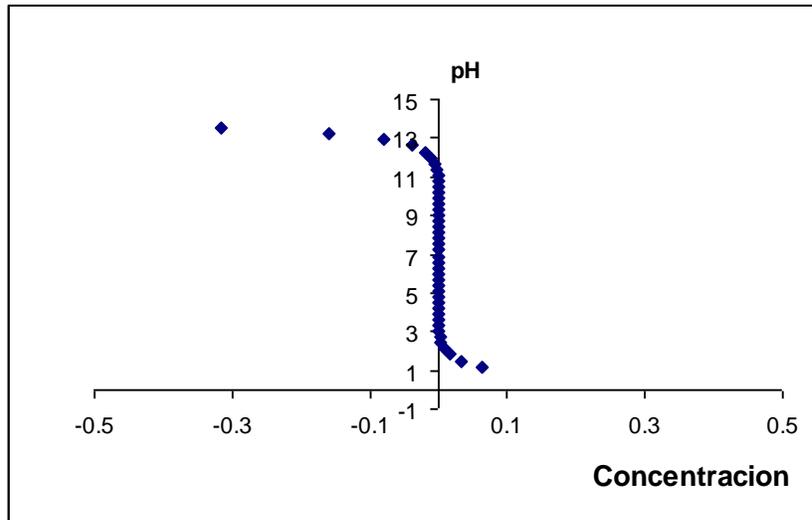


Figura 5.1.3 Nivel de pH versus la concentración del flujo de entrada

Nótese que la linealización se realizará para valores que oscilen entre $2 < pH < 12$, en la cual se muestra un comportamiento relativamente lineal.

Obteniendo una única recta entre los valores definidos para el intervalo mencionado, está dada por:

$$y = -0.002 * pH + 0.014$$

Despejando pH se tiene que:

$$pH = 7 - 500y \quad (5.1.11)$$

De donde:

$$\frac{pH - 7}{y} = -500$$

De los elementos que constituyen el lazo de control, el sensor de pH y la bomba dosificadora presentan un comportamiento lineal. Por este motivo, a través de curvas lineales se logra representar su correspondiente función de transferencia y de esta manera, representan una ganancia unitaria para el sistema. Dichas curvas se implementan en el PLC como escalamientos de señales. La linealización para el sensor de pH implementada en el controlador, se muestra a continuación:

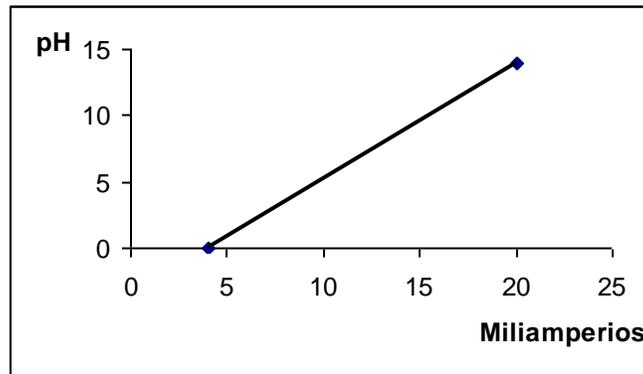


Figura 5.1.4 Linealización del sensor de pH.

De lo anterior, se concluye que la bomba dosificadora se comporta como un saturador de comportamiento lineal, el cual se presenta un límite inferior y un límite superior que corresponden a los valores mínimos y máximos de caudal (L/s) que puede proporcionar la bomba (Ver anexo B.2), para que de esta manera represente una ganancia unitaria. Además de esta manera, se concluye que la función de transferencia del sensor es $H(s)=1$. Bajo estas premisas, en la figura 5.1.5 se muestra el diagrama final del modelo de la planta.

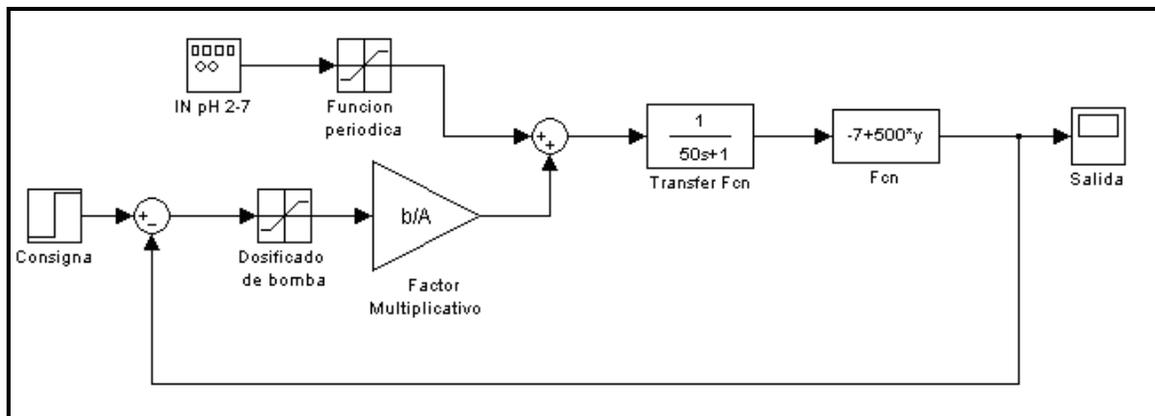


Figura 5.1.5 Diagrama final del modelo a implementar.

5.2 Selección de hardware

Una vez modelada la planta, se tiene una idea clara de los valores máximos de las variables de flujo y pH que se pueden esperar en la planta de tratamiento de Sigma Alimentos. Asimismo, estos valores conllevan a la selección minuciosa de cada uno de los equipos mecánicos y de control a seleccionar. De esta manera, a continuación se presenta el detalle de cada uno de estos dispositivos.

5.2.1 Hardware de tipo electromecánico

El punto de inyección de base según los requerimientos del sistema se realiza directamente mediante la adición de dicha sustancia en la tubería.

La bomba dosificadora utilizada para la dosificación de base posee una pantalla de tipo LCD. Puede ser configurada para seleccionar un control interno o externo, es decir, operada en forma remota desde el PLC o en forma local a través de un operador de mantenimiento.

Si se selecciona el control interno la frecuencia de dosificación se puede ajustar de 1 a 100 pulsaciones (por minuto o por hora según la programación) mediante la graduación que las bombas poseen en el panel principal (ver figura 5.2.1).



Figura 5.2.1 Vista frontal de la bomba dosificadora para el control de pH constante.

En el control externo existen tres tipos de configuraciones:

5.2.1.1. División de pulso

5.2.1.2. Multiplicación de pulso

5.2.1.3. Control por señal analógica 4-20 mA.

A continuación se detalla el funcionamiento de cada una de las anteriores configuraciones en el orden establecido.

5.2.1.1 División de pulso.

Es el control que la bomba dosificadora posee por defecto. El rango válido para esta configuración toma valores entre 1 a 999. Cuando la bomba se encuentra en funcionamiento, la velocidad en pulsaciones por minuto son calculadas en base al valor de pulsos de entrada entre el valor de división establecido.

Si la velocidad calculada por el controlador interno es menor a 1 pulso por minuto, en la pantalla LCD se muestra un valor de cero. Por el contrario, si la velocidad calculada es mayor a 1000 pulsos por minuto, se mostrará el código de error “E3” en forma periódica hasta que la condición de falla sea corregida.

5.2.1.2 Pulso Multiplicador

Como en el caso anterior, el rango válido para el valor multiplicativo es entre 0 – 999 pulsos. Cuando la bomba dosificadora se encuentra encendida, un solo pulso externo inicializará un ciclo de pulsaciones por minuto en cuenta regresiva. Cuando se alcanza el cero, en el display se reinicia al valor multiplicativo. La bomba estará lista para iniciar otro valor multiplicativo.

Si un pulso es recibido antes que la cuenta regresiva finalice, el comando de error “E4” aparece y se reinicia el valor desplegado en la cuenta regresiva por el nuevo valor programado e inicia una nueva cuenta. Existe la posibilidad de utilizar la función llamada “Batch Acumulate” la cual permite tener alguna entrada extra de pulsos recibidos en el modo multiplicador con un máximo de 999. Si dicha función es habilitada y un pulso es recibido durante la cuenta regresiva, el valor nuevo multiplicativo se suma al valor predeterminado anteriormente, y en la pantalla LCD se alternan los valores del multiplicador actual y el valor acumulado.

5.2.1.3 Control por señal analógica 4-20 mA.

La bomba acepta una señal directa de 0-20 mA o de 4-20 mA. La repuesta de esta señal es completamente programable. La velocidad es determinada por la respuesta de la curva definida por los parámetros P1 y P2. Los valores por defecto corresponden a 4 mA equivalen a 0 pulsos por minuto, mientras que 20

mA equivalen a 100 pulsos por minuto, tal y como se muestra en la figura 5.2.2. Sin embargo, estos valores son totalmente configurables para seguir la curva de mejor ajuste al comportamiento real de la planta.

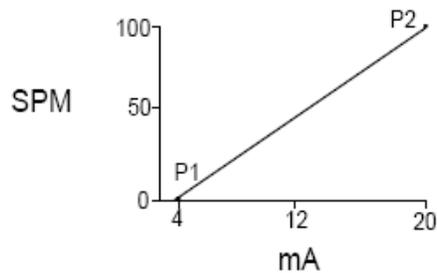


Figura 5.2.2 Curva de porcentaje versus miliamperios para la dosificación de base.

Para configurar la frecuencia de pulsaciones, se puede escoger los modos entre pulsaciones por minuto o pulsaciones por hora. Para ello, es necesario ir al modo de configuración desde el menú principal.

En la figura 5.2.3 se muestra un esbozo de las dimensiones de la bomba.

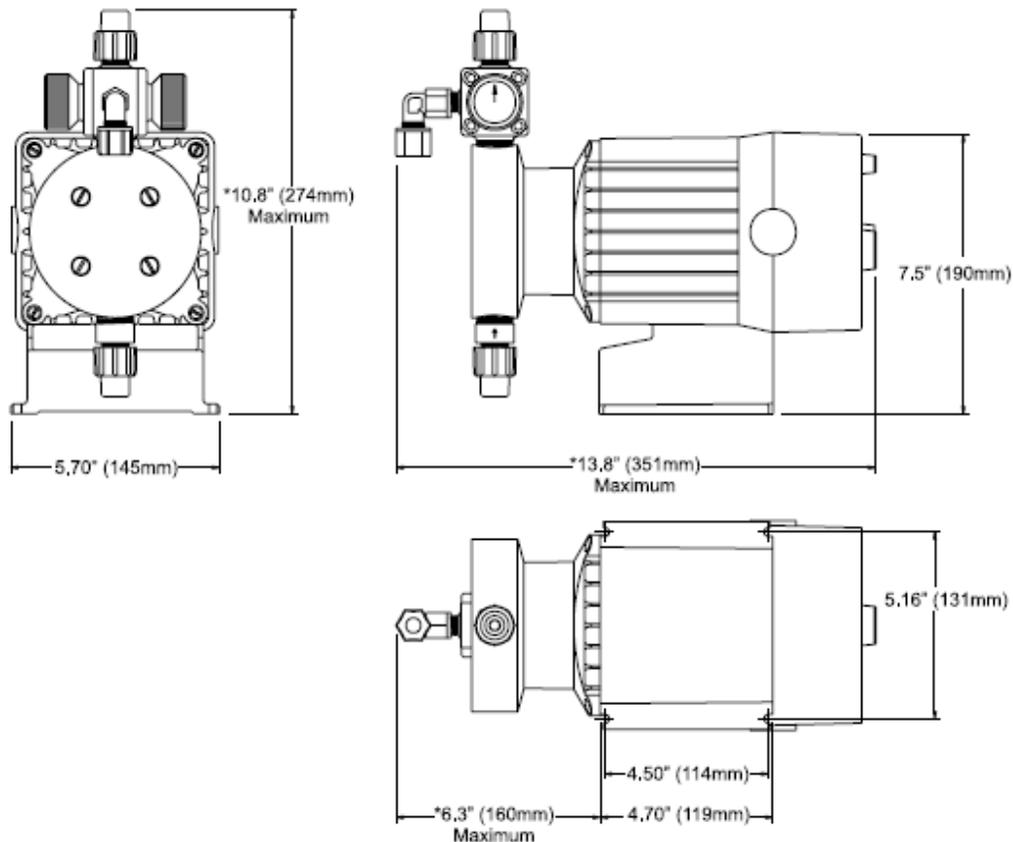


Figura 5.2.3 Esquemático de la bomba de dosificación para el control de pH constante.

5.2.2 Hardware de control

Los equipos de control se introducen en un gabinete que posee protección de tipo IP-66. En la figura 5.2.4 se muestra una fotografía de vista frontal de dicho gabinete.

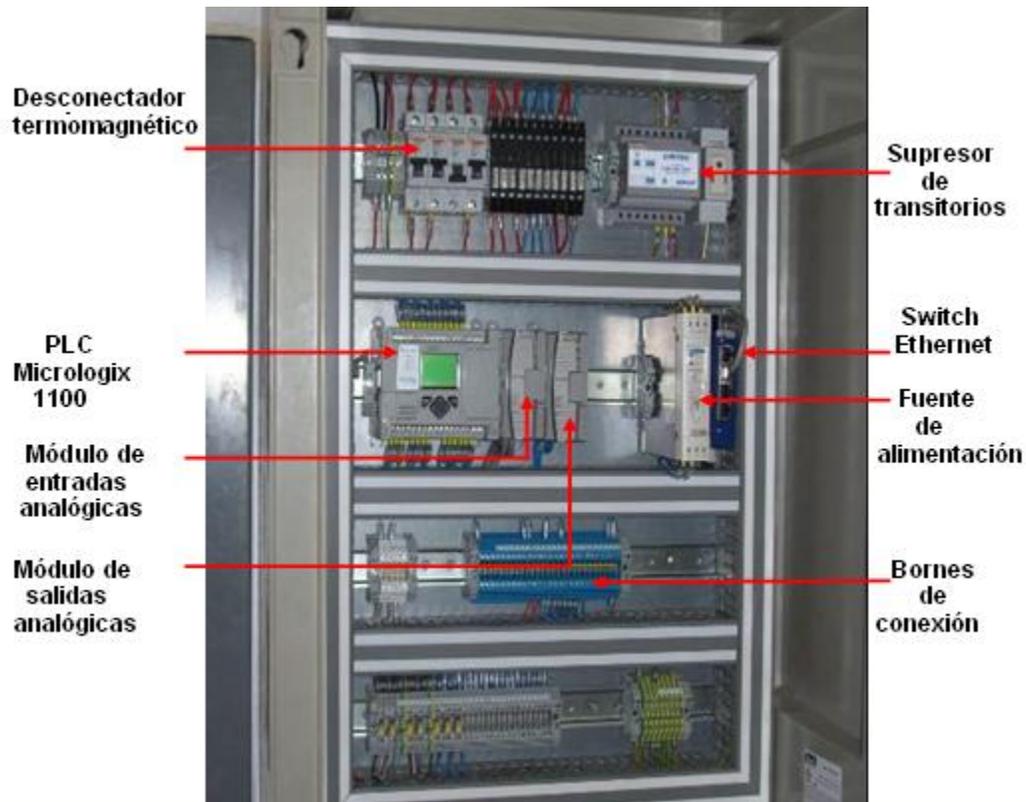


Figura 5.2.4 Vista frontal del gabinete de control implementado.

A continuación se detallan los equipos que poseen mayor relevancia para el control de pH constante.

5.2.2.1 Controlador lógico programable (PLC)

Debido a la relación costo beneficio, se seleccionó un controlador lógico programable capaz de soportar entradas y salidas analógicas para el control de las bombas dosificadoras. En este dispositivo es un microcontrolador en el cual se ha programado el sistema de control requerido para actuar sobre la velocidad de dosificación de las bombas según el valor de pH en la entrada del tanque de aireación.

Un requerimiento primordial de la aplicación consiste en conectarse a la red Ethernet de Sigma Alimentos para lograr visualizar este control a través de la red en otros computadores de la misma red.

De esta manera, se ha elegido el PLC Micrologix 1100 cuya marca es Allen Bradley. En la figura 5.2.5 se muestra un esquema físico del PLC seleccionado.

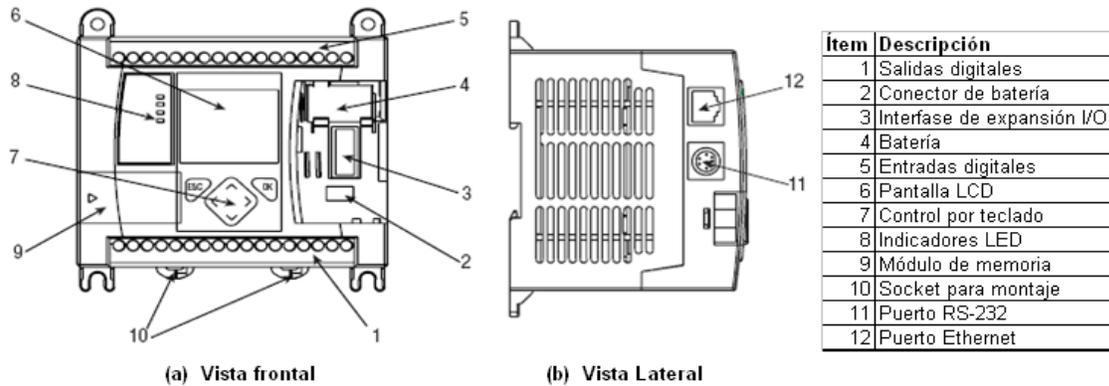


Figura 5.2.5 Esquema del PLC Micrologix 1100 utilizado para el control de pH constante.

Este controlador es capaz de manejar un máximo de cuatro módulos de expansión de entradas y salidas. En la tabla 5.2.1 se muestran los diferentes módulos que pueden ser conectados a este controlador.

Tabla 5.2.1 Módulos de entradas y salidas compatibles con el controlador MicroLogix 1100.

Catálogo	Tipo	Descripción
1762-IA8	DIGITAL	Módulo de 8 entradas digitales a 120 Vdc.
1762-IO8		Módulo de 8 entradas a 24 Vdc.
1762-IQ16		Módulo de 16 entradas a 24 Vdc.
1762-OA8		Módulo de 8 salidas a 120 Vdc.
1762-OB8		Módulo de 8 salidas sourcing a 24 Vdc.
1762-OB16		Módulo de 16 salidas sourcing a 24 Vdc.
1762-OW8		Módulo de 8 salidas a relay AC/DC.
1762-OW16		Módulo de 16 salidas a relay AC/DC.
1762-OX6I		Módulo de 6 salidas aisladas a relay AC/DC.
1762-IQ8OW16		Módulo de 8 entradas a 24 Vdc y 6 salidas aisladas a relay AC/DC.
1762-IF4	ANALÓGICA	Módulo de 4 entradas analógicas de voltaje o corriente.
1762-OF4		Módulo de 4 salidas analógicas de voltaje o corriente.
1762-IFOF2		Módulo analógico de 2 canales de entrada y 2 canales de salida de voltaje o corriente.
1762-IR4		Módulo de 4 canales de entrada para RTD
1762-IT4		Módulo de 4 canales de entrada para termocupla.

Entre las opciones de comunicaciones que posee este controlador se destacan:

- Puerto serial para interfaces de operador y computadoras personales.
- Redes DH-485.
- Redes.
- Redes de radio módem DF1.
- DF1 como RTU maestro y como esclavo
- Redes Modbus RTU maestro o RTU esclavo.
- Redes ASCII
- Redes DeviceNet como esclavo

El Micrologix 1100 soporta comunicaciones Ethernet en el canal 1, para poder conectarse a la red de área local y proveer comunicaciones entre dispositivos a 10 Mbps o 100 Mbps. O mediante el puerto serial (canal 0), se puede programar el dispositivo para descargar el programa.

5.2.2.2 MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS 1762-IF4

El módulo de entradas analógicas posee una configuración para entradas analógicas de voltaje o de corriente mediante la selección de un switch ubicado en un costado del mismo (ver figura 5.2.6), por defecto la configuración de fábrica es de corriente.

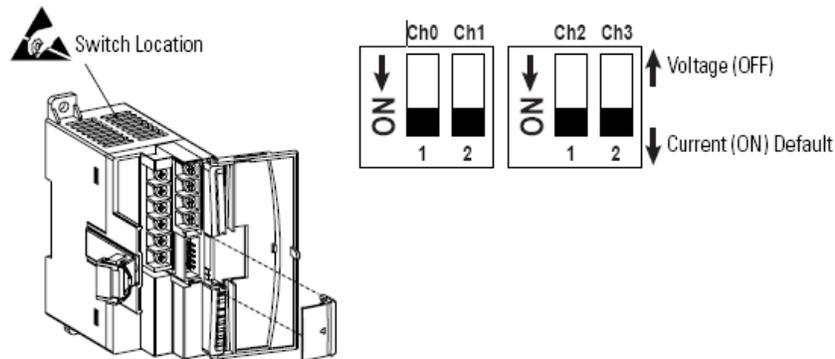


Figura 5.2.6 Módulo de entrada analógica 1762-IF4.

Dicho módulo de entradas analógicas permite recibir la entrada proveniente de dispositivos electrónicos cuya salida es de corriente o voltaje. Tal y como es el caso de los transmisores y de sensores. En la figura 5.2.7 se muestra un diagrama para la conexión de diferentes dispositivos analógicos al módulo según la cantidad de hilos que poseen.

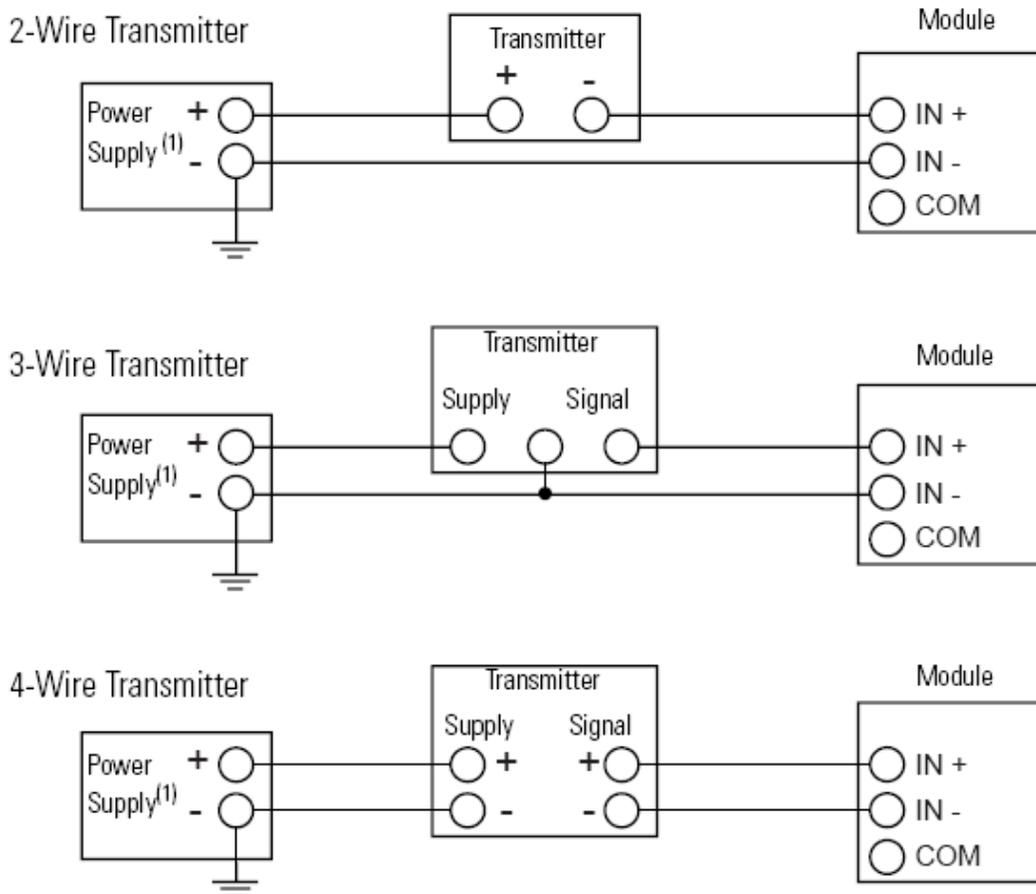


Figura 5.2.7 Conexión de dispositivos analógicos al módulo 1762-IF4.

Para realizar una correcta lectura se debe de configurar el modo de operación del escalamiento en el módulo. Los dos tipos de configuración se denominan: proporcional y datos para el control PID y son configurables desde el software de programación del MicroLogix.

5.2.2.3 MODULO DE SALIDA ANALÓGICA 1762-OF4

Similarmente al módulo de entradas analógicas caracterizado anteriormente, el módulo de salidas analógicas cuenta con dos tipos de formato de salidas: proporcionales o de tipo PID.

Para el control de pH, se implementó un control tipo PID. Para este caso, la salida de módulo posee un convertidor analógico a digital capaz de proporcionar una salida en un rango entre 0 y 16380.

Para la configuración de dicho módulo, se debe de configurar cada canal por separado. A continuación se muestra la forma de configuración de las salidas a través del software RSLogix 500.

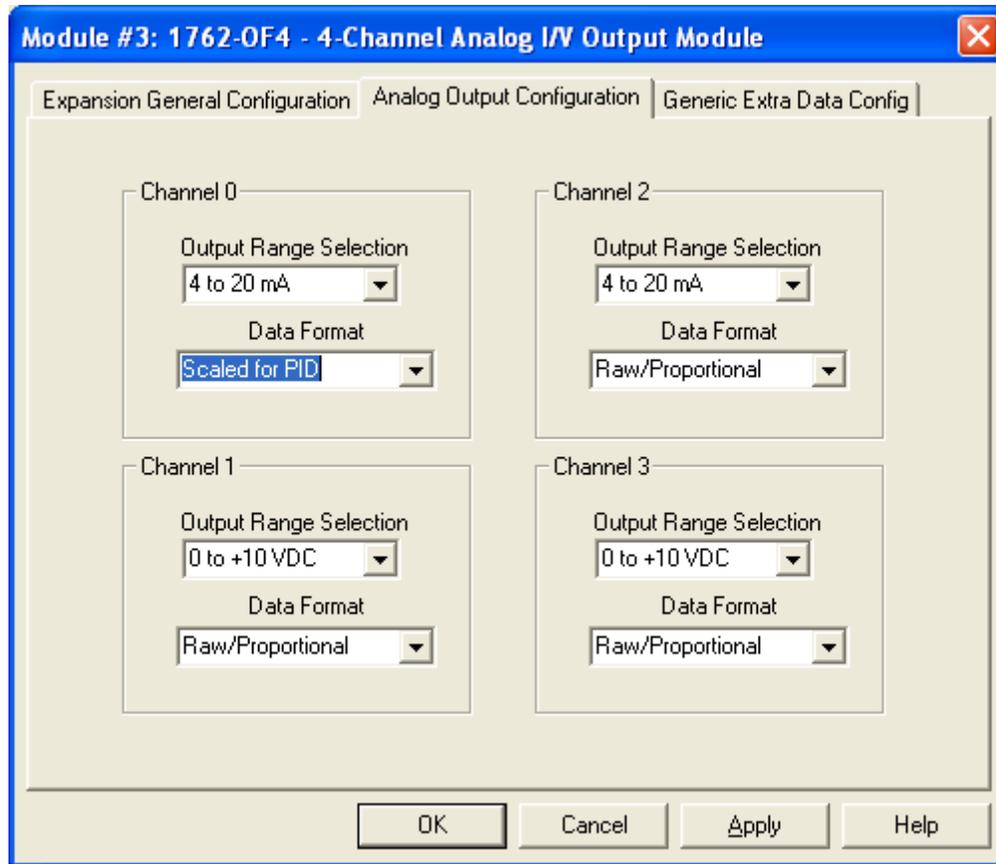


Figura 5.2.8 Configuración del módulo de salida 1762-OF4 con el software RSLogix500.

5.2.2.4 Switch Ethernet.

La comunicación Ethernet es un estándar de redes de computadoras conocido como IEEE 802.3. Posee diferentes velocidades de transmisión de datos según la categoría, tipo de cable y factores como atenuación de la señal.

Se utiliza este dispositivo para lograr conectarse a la red de datos de la empresa Sigma Alimentos. Mediante este tipo de conexión se logra transmitir la información de un PLC hasta un sistema receptor tal como un software SCADA.

En el anexo C se presenta la tabla que muestra las características principales de este tipo de comunicación.

5.2.2.5 Sensor de pH

El principio de medición de los sensores de pH consiste en generar una diferencia de potencial en respuesta al cambio en la concentración de una determinada especie química utilizada como muestra con la sustancia ubicada dentro del sensor utilizada como referencia.

Son llamados sensores potenciométricos selectivos de Ión ya que su medición se basa en la diferencia de potencial entre dos fases las cuales poseen diferente concentración. Cuando se presenta la situación en que solo una concentración presenta variaciones de fase, la membrana del sensor permite el paso de un Ión específico. La tendencia de dicho Ión a difundirse de mayor concentración a la de menor concentración contrarresta la aparición de un potencial eléctrico debido a la carga del Ión. La ecuación que describe la diferencia de potencial es la siguiente:

$$E = \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{a_1}{a_2}\right) \quad (5.2.1)$$

A continuación se describe cada una de las variables utilizadas en la ecuación 5.2.1:

E = Diferencia de potencial eléctrico [V].

R = Constante universal de los gases. Posee un valor de: $0,08205746 \left[\frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$

T = Temperatura en grados Kelvin.

z = valencia del Ión.

a_i = actividad del Ión, que para un liquido es ($a_i = C_i f_i$) donde C_i es la concentración de la especie (i) y (f) es el coeficiente de actividad que describe el grado en que el comportamiento de la especie (i) se aleje del ideal, por esta razón su valor siempre es menor a 1.

En la figura 5.2.9 se muestra el principio de operación del sensor de pH mediante la diferencia de potencial entre dos compuestos: uno utilizado como referencia y otro utilizado como muestra.

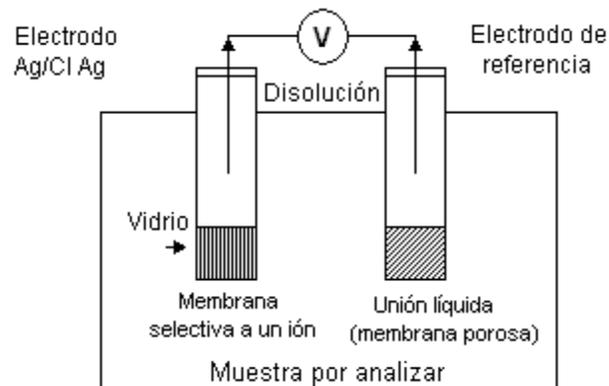


Figura 5.2.9 Principio de funcionamiento del sensor de pH

El sensor inicia su operación al producirse una diferencia de potencial cuando se altera el equilibrio iónico de la sonda que está directamente en contacto con la sustancia a medir (membrana porosa) con respecto a la otra sonda que presenta en su interior una sustancia conocida (membrana selectiva a un ión).

El electrodo de vidrio sensible está formado por un delgado bulbo de vidrio, fundido al extremo de un fino tubo de cristal el cual no es sensible al pH. El bulbo está relleno con un líquido de pH constante llamada solución "tampón". En la solución se encuentra un cable de plata cubierto con cloruro de plata.

Se crea un potencial superficial en la punta sensible al pH del electrodo debido a la composición de las moléculas del cristal. Esto se debe a que la membrana de vidrio proporciona un medio de recolectar iones de hidrógeno de forma que su potencial pueda ser medido. De esta forma, los iones hidrógeno embebidos en la superficie externa de la membrana de vidrio están en equilibrio molecular con los iones hidrógeno de la solución muestra. Entonces a medida que cambia la concentración de iones de hidrógeno en el electrodo también cambian produciéndose una variación en el potencial del electrodo de vidrio, lo que se transforma a una medida de pH. En la figura 5.2.10 se muestra un esquemático del electrodo de vidrio.

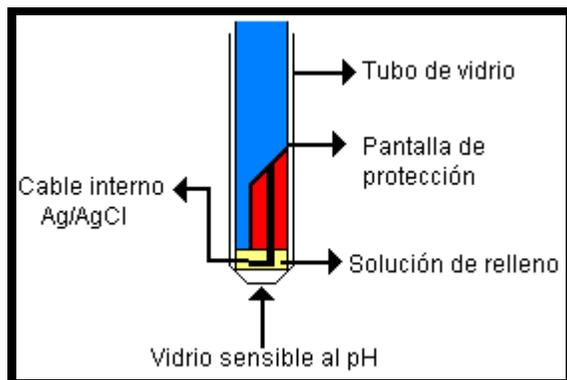


Figura 5.2.10 Representación del electrodo de vidrio del sensor de pH.

El electrodo de referencia se utiliza para completar el circuito y proporcionar un potencial constante de referencia contra el que se puede comparar el potencial del electrodo de vidrio antes detallado.

El electrodo de referencia tradicional es el calomel (cloruro mercurioso). Para ser conectado eléctricamente, se extiende un cable de platino por el interior del tubo que hace contacto con el mercurio. Un tubo exterior contiene una solución saturada de cloruro potásico y termina en la superficie porosa (ver figura 5.2.11). Se puede utilizar materiales como: vidrio, cerámica o fibra de asbesto

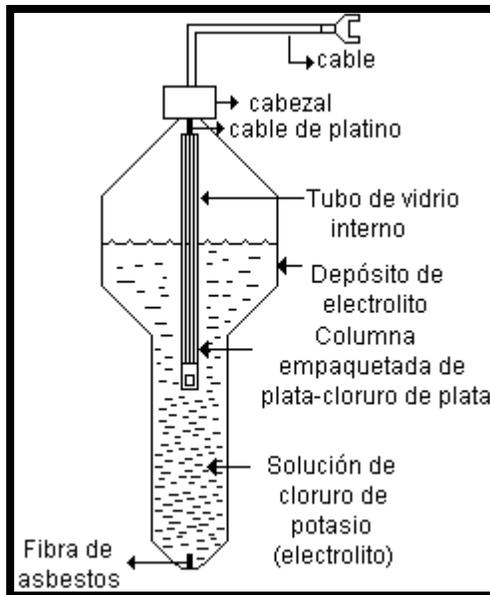


Figura 5.2.11 Electrodo de referencia clásico para un sensor de pH.

El sensor utilizado en esta aplicación es de la marca HACH. Trae un sistema electrónico integrado y un cable de 10 m para la conexión al transmisor. El rango de medición del sensor de pH es de 2 a 14. Su temperatura de operación se encuentra en el rango de -5 a 70°C. Puede ser sumergido en la muestra. El detalle del mismo se muestra en la figura 5.2.12

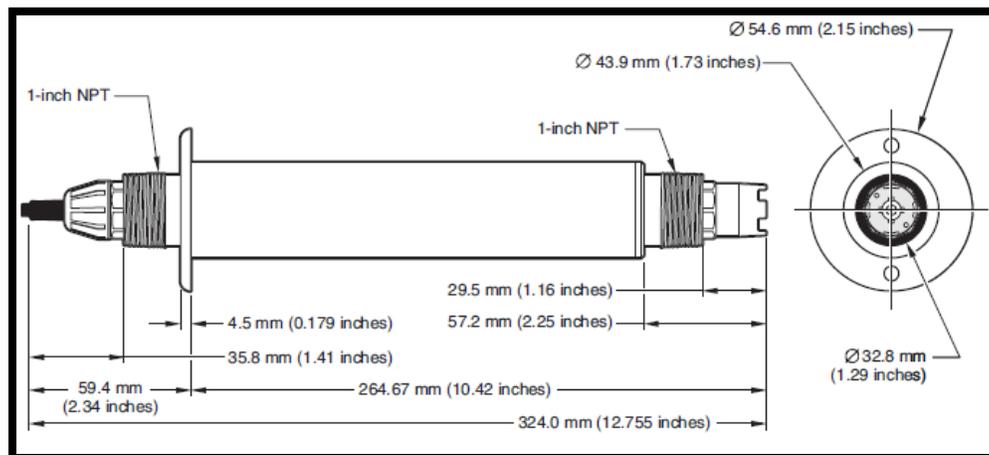


Figura 5.2.12 Sensor de pH utilizado.

5.2.2.6 Transmisor de pH

El transmisor de pH tiene por objetivo recibir la señal de sensores de pH, ORP u oxígeno disuelto y transformarla a una señal que el PLC pueda decodificar. Típicamente la señal hacia el PLC es de corriente ya sea en configuraciones de

0-20 mA o de 4-20 mA según se programe en el transmisor. El transmisor utilizado es de tipo HACH SC100 el cual posee características de comunicaciones y almacenamiento de datos que lo hacen versátil.

En la siguiente tabla se muestran las características más destacadas del transmisor utilizado.

Tabla 5.2.2 Especificaciones del transmisor de pH utilizado

Especificación	Descripción
Descripción del componente	Unidad de medida controlada por un microprocesador con pantalla para visualización de lectura.
Temperatura de operación	-20 a 60 °C, 95% humedad relativa.
Cubierta	Cerrojo de metal con protección NEMA 4X/IP66
Alimentación	120 VAC a 50/60Hz
Salidas	Dos salidas analógicas aisladas (4-20 mA)
Dimensiones	144x144x150mm (5.7x5.7x5.9 pulg)

El controlador puede recibir la señal de dos sensores con entradas independientes o aisladas y desplegar sus mediciones simultáneamente en la pantalla principal. En la figura siguiente se muestran las partes principales del transmisor en vista frontal.

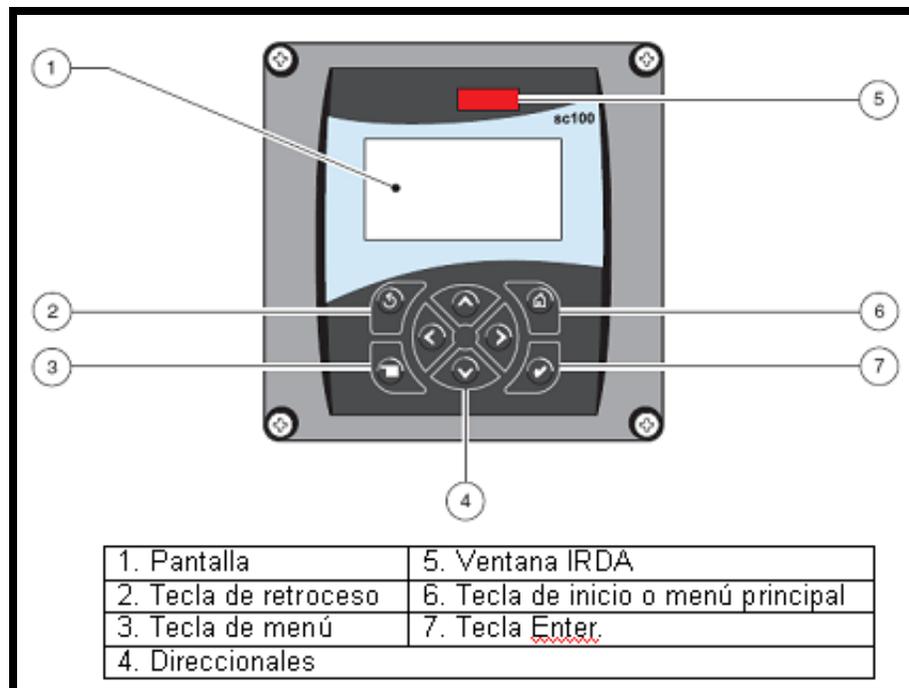


Figura 5.2.13 Vista frontal del transmisor del sensor de pH.

Como se mencionó se proveen de dos salidas analógicas, de rango configurable (0-20mA ó 4-20mA), en la figura 5.2.14 se presenta la conexión que se debe realizar para la configuración de dos salidas aisladas.

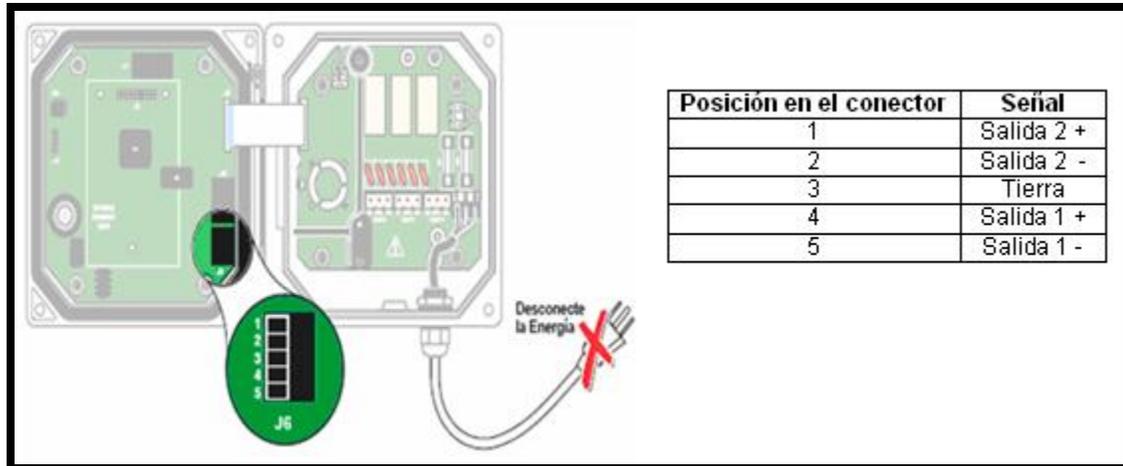


Figura 5.2.14 Ubicación de las salidas analógicas para el HACH

La selección de este dispositivo se realizó debido a que su salida es compatible con el módulo de entrada analógica utilizada por el PLC y explicado anteriormente.

Adicionalmente, este transmisor tiene la característica de poseer una memoria interna capaz de almacenar los valores de pH en el tiempo a través de una base de datos, lo cual permite a los especialistas de Sigma Alimentos corroborar el comportamiento de las variables a controlar. En el apéndice A.3 se presenta la forma de calibración del sensor de pH mediante cuatro distintos procedimientos.

5.3 Implementación de hardware

Con el objeto de controlar el nivel de pH se dispone a utilizar la bomba dosificadora capaz de suplir cantidades de base en función del nivel de pH actual a la salida del reactor. Para el control de dicha bomba, se implementó el gabinete de control mostrado en la figura 5.2.4, el cual posee un PLC capaz de enviar a la bomba, el comando de dosificación instantánea de base a través de una señal analógica.

Se ha utilizado como dispositivo de control el PLC por varios motivos. El primero de ellos, es la facilidad de programación a través de “ladders”, como se explicará mas adelante. Posee versatilidad de manejo de protocolo de comunicaciones para conectarse a sistemas de adquisición de datos (SCADA) u otros controladores programables. Además, permite la expansión de módulos de entradas y salidas en caso de ampliar el sistema de control, entre otros.

El gabinete posee un supresor de voltaje (120 VCA) como medio de protección a los equipos en caso de que a la acometida se le suministrara picos inesperados de alta tensión y dañe los equipos de control. Adicionalmente, se conecta al PLC un módulo de entradas analógicas para la conexión del sensor de pH cuya señal de entrada es de 4 a 20 mA a través del transductor SC100. Un módulo de salida analógica es necesario para enviar la señal analógica necesaria a la bomba, procurando de esta manera, mantener constante el valor de pH.

Un sistema de visualización tipo SCADA permite al operario la selección del modo de control ya sea manual o automático del sistema implementado.

El control manual consiste en la introducción de una velocidad específica expresada en porcentaje. De esta manera, el operario puede comandar las acciones de control de inicio y paro de la bomba dosificadora.

Por el contrario, el modo automático permite dotar al sistema de un control constante según el nivel de pH que determine el sensor. Es tarea del operador ingresar el valor (consigna) de pH que el sistema deberá mantener constante. El controlador lógico programable es el encargado de regular mediante un compensador tipo PI, la velocidad de dosificación de base.

Mediante el sistema SCADA, se puede conocer el estado de la bomba dosificadora, y su caudal de dosificación, ya que mediante animaciones se generan tipos de luces indicadoras de un correcto funcionamiento, falla o el status de apagado de la bomba, mediante la lectura de la confirmación de encendido de la bomba.

5.4 Implementación del software

El control del pH constante se puede dividir en dos etapas de programación. La primera etapa corresponde a la programación del PLC Micrologix 1100 [12], en donde se genera el controlador diseñado haciendo uso del software RSLogix500 de Rockwell Automation. Este programa consiste en programación en escalera o comúnmente conocido como “Ladder”.

Por otro lado, se debe de programar un software de interfase de usuario para lo cual se ha generado una aplicación tipo SCADA llamado RSView 32, propiedad de Rockwell Automation. Este programa se descarga en una PC en donde el usuario puede interactuar con la misma. En las secciones siguientes se detalla cada uno de ellos.

5.4.1 Software del PLC en RSLogix500

Como se ha mencionado anteriormente, se ha generado la lógica de control en un microcontrolador programable mediante el programa llamado RSLogix500 compatible con la familia Micrologix de Allen Bradley.

En la figura 5.4.1 se muestra el ambiente de trabajo del programa RSLogix500. Posee tres secciones claramente definidas. La primera es el menú de opciones (típica de entorno Windows) y con el menú de instrucciones disponibles para este PLC. Cabe destacar que el set de instrucciones es independiente para cada uno de los PLC en la familia Allen Bradley.

Seguidamente, en la parte de la izquierda se encuentra el menú general del proyecto en donde se realizan funciones como: configuración del PLC con sus respectivos módulos de entradas y salidas de tipo digital o analógico, así como el tipo de comunicación entre PLC y el sistema SCADA. Los PLC pueden ser compartir información ya sea con sistemas SCADA o pantallas de operador. No obstante, la comunicación se establece en esta cejilla.

Adicionalmente, se muestran los archivos creados por el programador del sistema, llamados “Ladders”, finalmente se muestran la tabla de datos utilizados, esto con el fin de ofrecer la posibilidad al programador de visualizar cuales variables no ha utilizado y de ver el valor de cualquier variable al ejecutar el programa.

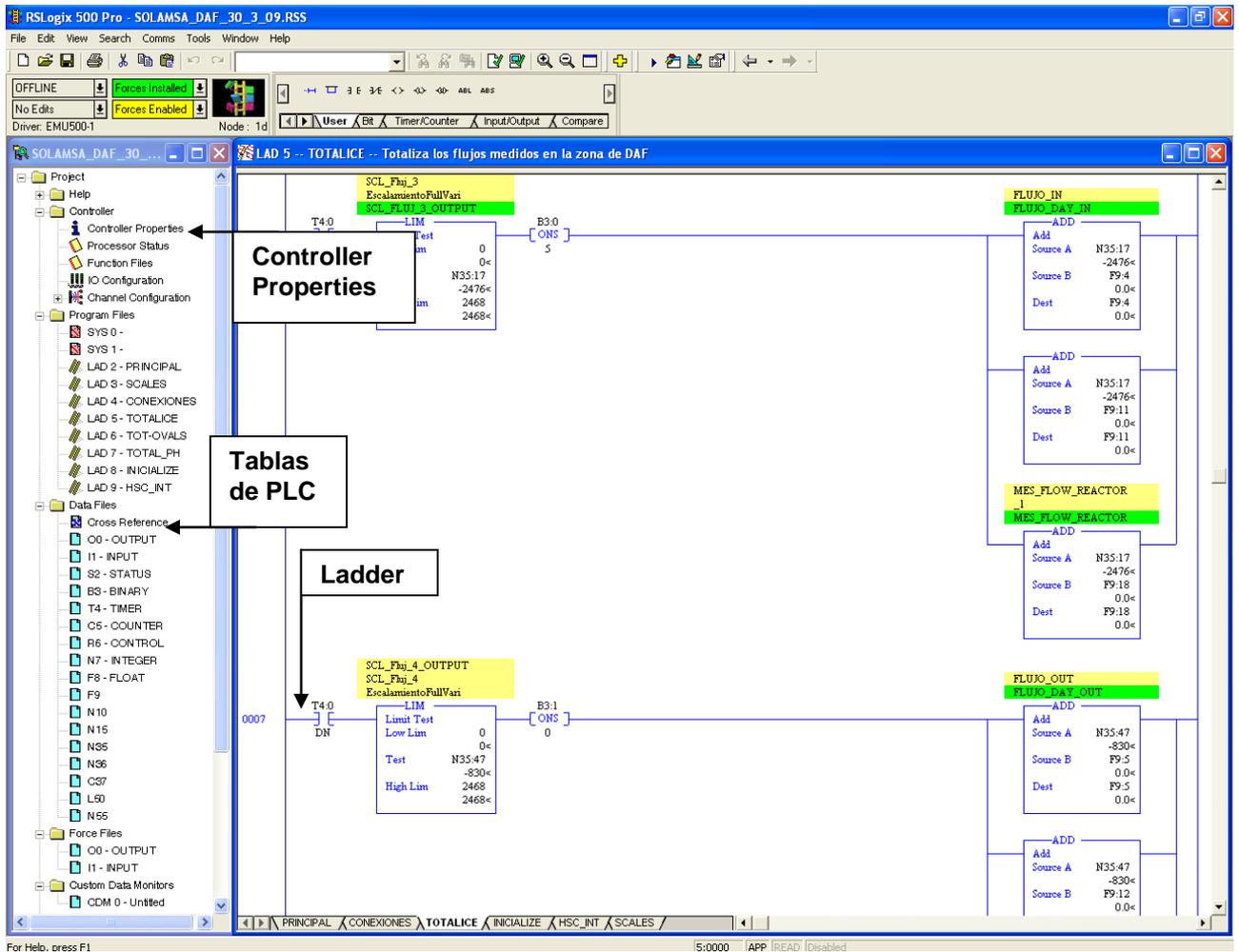


Figura 5.4.1 Plataforma del software RSLogix500

Para la configuración de las propiedades del PLC se debe de seleccionar la opción “Controller properties” ubicada en el explorador de la izquierda. De esta manera se visualiza el cuadro de diálogo mostrado en la figura 5.4.2.

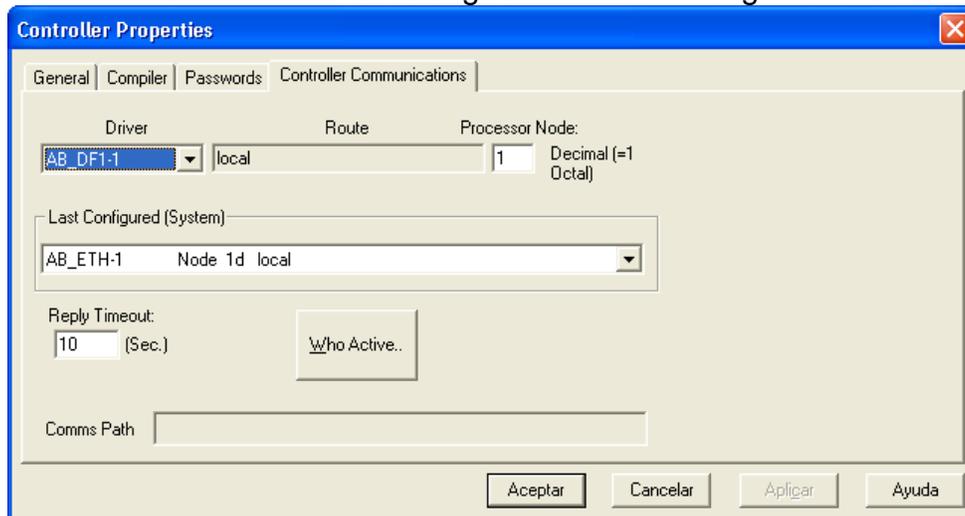


Figura 5.4.2 Propiedades del controlador.

En la pestaña General, se realiza la escogencia del PLC a programar, es decir, el Micrologix 1100. En la pestaña “Controller communications” se configura el protocolo de comunicación a ser utilizado, para este caso es el protocolo Ethernet por medio del cual se comunica el PLC a la interfaz gráfica tipo SCADA.

Seguidamente, se debe de configurar los módulos de entradas y salidas que se requieren en la aplicación. Se debe de configurar en un orden específico, ya que el programador deberá utilizar los direccionamientos de las entradas y salidas según el orden propuesto.

Se ha adquirido un módulo de entradas analógicas para la recepción del sensor de pH. Mientras que otro módulo de salidas analógicas se ha utilizado para el envío de información para el control de la bomba dosificadora de base. Todas las señales fueron configuradas de 4 a 20 mA para ser compatibles con los equipos. En la figura 5.2.8 de la sección anterior se muestra el cuadro de diálogo en donde se configura cada una de los módulos de entradas y salidas.

La programación de lógica de control se realiza mediante “ladders” los cuales son archivos de tipo programación en escalera. Es en este tipo de archivos donde se hace uso de la gama de instrucciones que puede utilizar el Micrologix1100 tales como sumadores, multiplicadores, movimientos de variables, comparaciones, etc. Adicionalmente, se realiza la lógica del controlador diseñado para lograr que el microcontrolador tome el mando de control automático sobre la variable de pH.

En el anexo B.5 se muestra la información correspondiente al bloque PID dispuesto para los programadores de PLC Micrologix 1100. Se muestran los parámetros los cuales a través de una ecuación de PID se calcula el comando de velocidad de dosificación de la bomba. Para ello, se requiere módulos analógicos de entrada para medir el pH actual y módulo de salida analógica para enviar la señal a la bomba calculada a partir de la ecuación PID mediante las ganancias proporcionales, derivativas e integrales. Nótese que al implementar el controlador PI, la constante derivativa es igual a cero.

Por otro lado, en la figura siguiente muestra un diagrama de flujo que caracteriza la secuencia de programación que se realizó en los ladders.

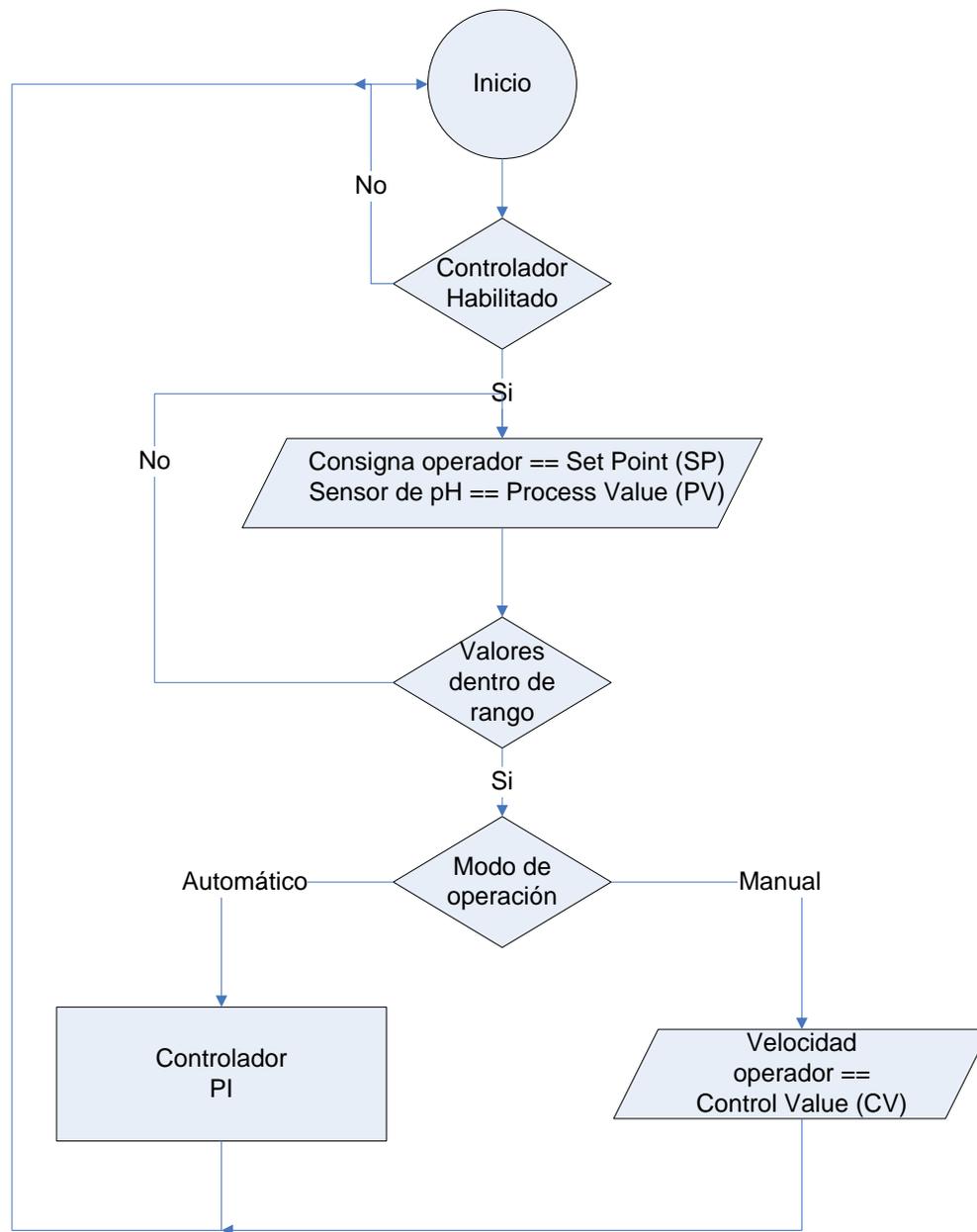


Figura 5.4.3 Diagrama de flujo a seguir para el controlador diseñado.

De esta manera, una vez que el controlador ha sido habilitado y los valores del sensor de pH y la consigna del operador se encuentran dentro del rango permitido, se asignan estos valores a las variables internas "PV", "SP" respectivamente del bloque de PID.

El modo de operación se selecciona a través del software SCADA en una pantalla exclusiva de configuración de modo de control. Si se escoge el modo AUTO, el microcontrolador abre la válvula y se ejecuta el algoritmo del bloque PI de acuerdo a los parámetros previamente establecidos y se realiza el control de la velocidad de dosificación de la bomba con el objetivo de lograr que el valor de

pH en el tanque sea igual al valor introducido por el operador, llamado consigna. La variable “CV” (Control Value) es el valor de control de la velocidad instantánea. En el modo AUTO dicho valor es copiado en la referencia de velocidad manual introducida por el operador, para de esta manera al cambiar el control de modo MANUAL a AUTO éste se encuentre en el último valor establecido en modo MANUAL y mantener el nivel de pH constante.

Por contraparte, en el modo manual el operador es el encargado de introducir el porcentaje de trabajo que desee mantener laborando la bomba dosificadora a través del software SCADA. La figura 5.4.4 muestra un diagrama de flujo en el cual se presenta el control en modo AUTO que realiza el controlador.

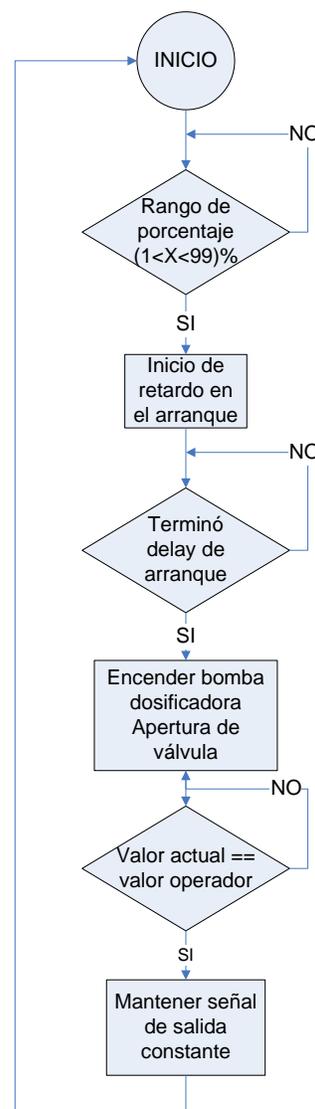


Figura 5.4.4 Diagrama de flujo del control AUTO de la bomba dosificadora.

5.4.2 Software de visualización tipo SCADA

El software utilizado para realizar la interfase con el usuario es el RSView32 de Rockwell Automation [12]. Permite la comunicación, transmisión y visualización de datos con el PLC Micrologix1100. El entorno de programación se muestra en la siguiente figura.

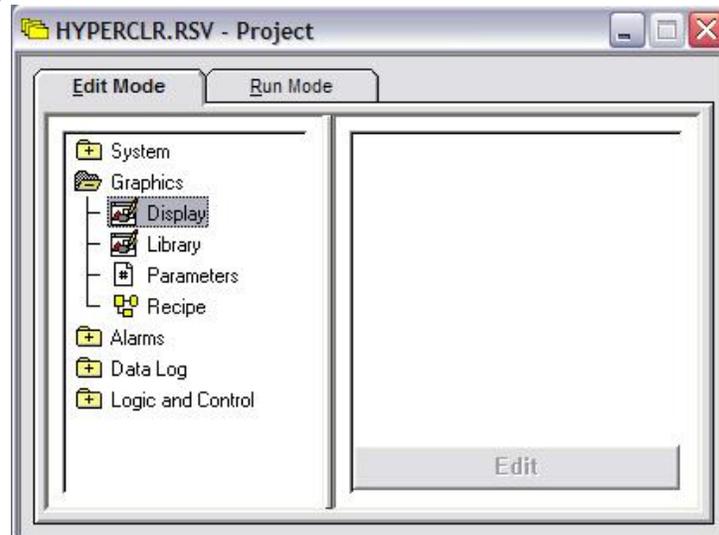


Figura 5.4.5 Entorno de programación del RSView32.

Cuenta con la posibilidad de programar pantallas de operador en sistemas HMI y sistemas SCADA que controlan el proceso a través de una PC convencional. Cuenta con un explorador de proyecto en donde se realizan diferentes configuraciones.

En el menú "System" se realiza la configuración de comunicaciones a través de diversos protocolos con conexiones de nodos que enlazan el sistema SCADA con los dispositivos periféricos, en este caso el PLC Micrologix 1100. Además se configuran otras opciones tal como la pantalla inicial.

Posteriormente, cuenta con un menú llamado "Graphics" en el cual el programador realiza cada una de las pantallas con la versatilidad de introducir figuras e imágenes prediseñadas (ubicadas en la cejilla de "Library") o importadas desde otra aplicación.

Dentro de las ventajas del sistema SCADA, se encuentra la posibilidad de generar bases de datos almacenando variables internas en el menú llamado "Data Log".

Se diseñó una aplicación SCADA con las siguientes pantallas:

- 1. Pantalla de visualización general:** Se crea una pantalla principal que muestra el diagrama general de la Planta de Tratamiento. Posee un menú de navegación en la parte inferior en donde el operario puede realizar:

Configuración de modo (manual-automático de la bomba), visualización de historial de alarmas e ingreso a la curva de pH. En la figura 5.4.6 se muestra la pantalla descrita anteriormente.

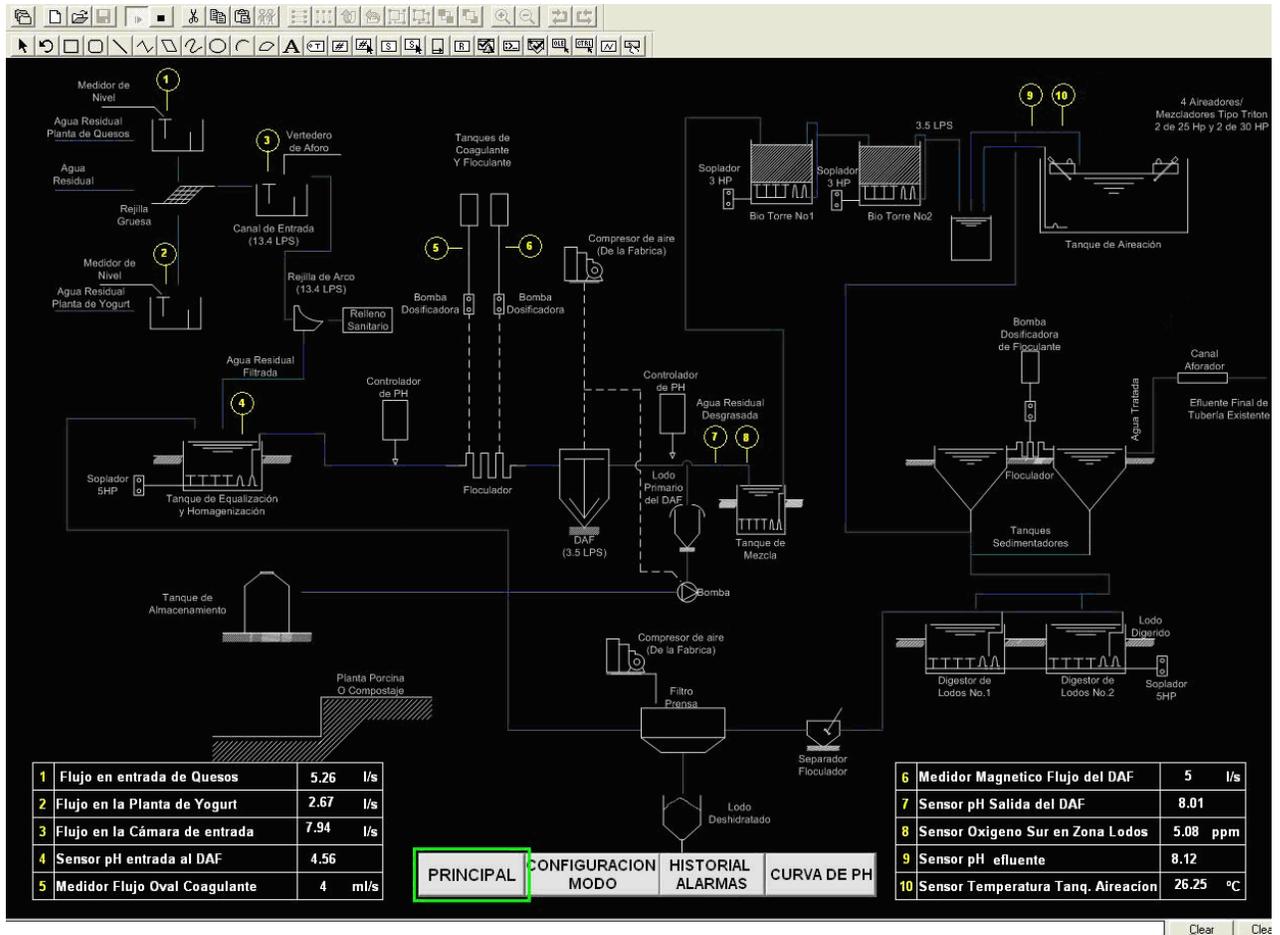


Figura 5.4.6 Pantalla de visualización general del proceso

2. Pantalla de configuración de modo: en esta pantalla el operario selecciona si desea realizar un control manual o automático de la bomba dosificadora de base a través de un botón de función “toggle”, es decir, selecciona el modo mediante un clic en el mismo. En el modo manual, la aplicación espera el ingreso del porcentaje de funcionamiento al cual dosificará la bomba. Mientras que en modo automático, el PLC toma el mando del control y regula el nivel de pH fijado en 8. En la figura 5.4.7 se muestra el control manual el cual acepta un cambio en la consigna o set point. Adicionalmente, se presenta en otra línea el valor de pH al cual corresponde el ser point ingresado. Presenta el estado de la bomba y de la válvula (verde significa que la bomba se encuentra dosificando y que la válvula se encuentra abierta) Además que presenta el nivel de llenado del tanque dosificador de base en color azul.

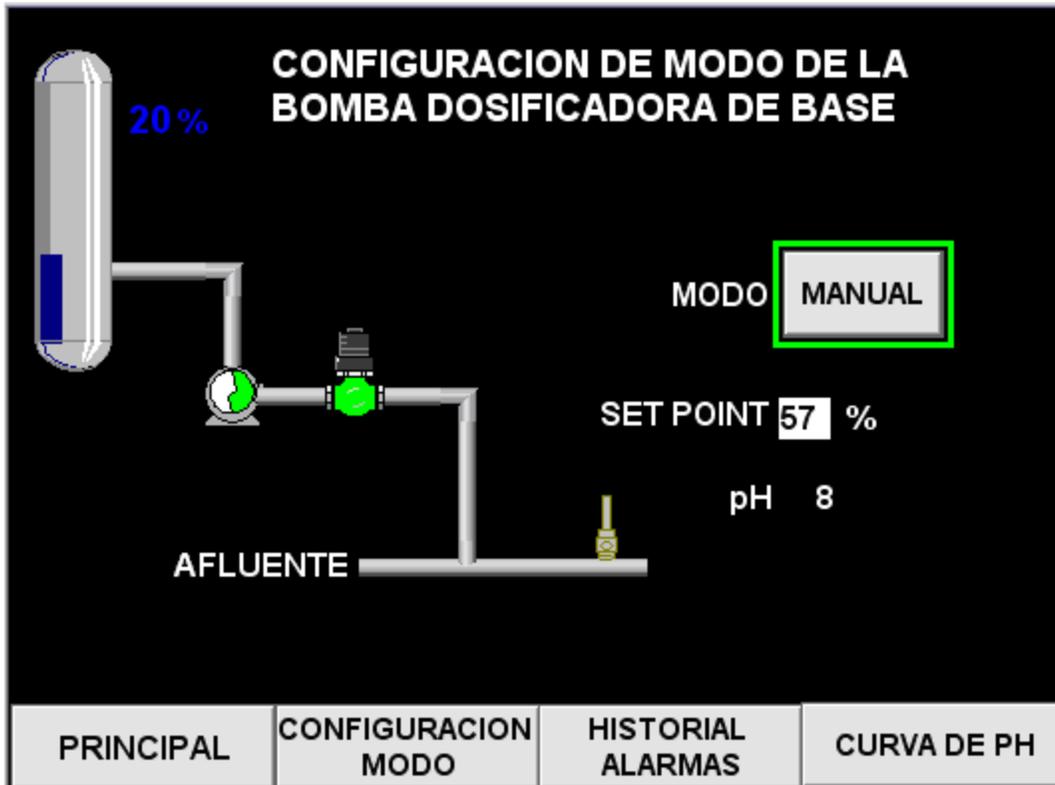


Figura 5.4.7 Pantalla de configuración de modo de la bomba dosificadora de base

3. Pantalla de historial de alarmas: la aplicación tiene el atributo de poder almacenar las alarmas que presenta el proceso y que se mencionan a continuación:

- Alarma por bajo nivel de pH: se genera una alarma cuando el pH es menor a 2, puesto que es un valor crítico de acidez y donde la bomba deberá de trabajar a su máxima capacidad de dosificación.
- Alarma por falla de confirmación de encendido de la bomba: se genera una alarma en la pantalla si la bomba es iniciada para actuar y no se recibe la confirmación de encendido.

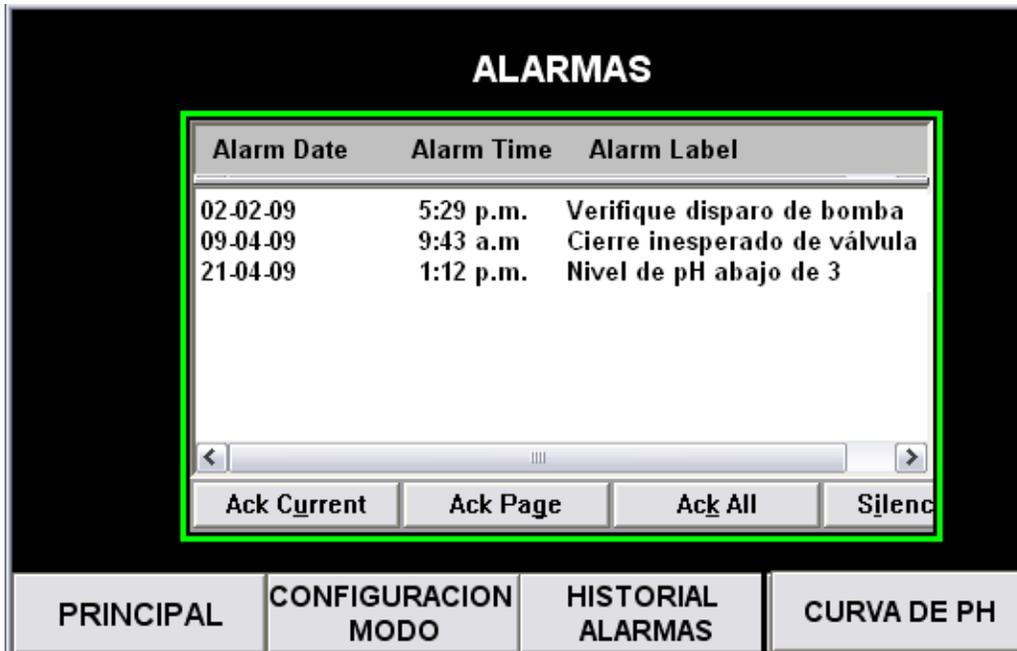


Figura 5.4.8 Pantalla de información de alarmas.

4. **Pantalla de curva de pH:** El software SCADA permite realizar curvas que muestren las mediciones en tiempo real de la variable de pH que detecta el sensor. De esta manera, se crea una pantalla exclusiva para mostrar el valor de pH en el tiempo. Se programa un promediador de la medición de pH en el PLC Con posibilidad de visualizar el promedio a nivel diario, semanal y mensual, tal y como lo muestra la figura siguiente.

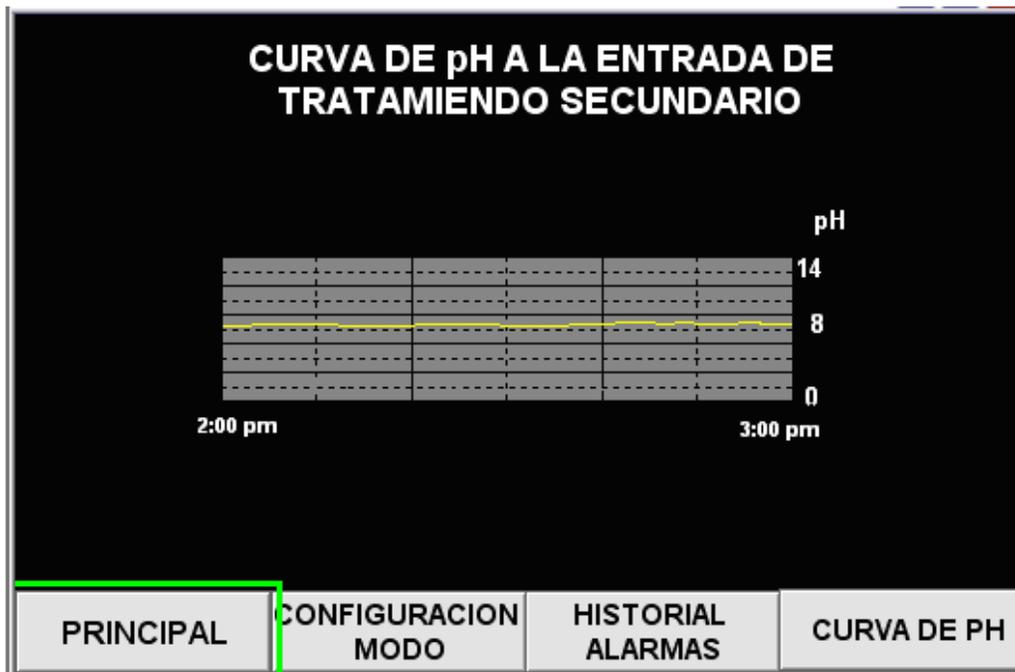


Figura 5.4.9 Pantalla de visualización del pH en la salida del tratamiento primario.

Capítulo 6: Análisis de resultados.

6.1 Simulación del modelo obtenido

Se ha utilizado el software Matlab Versión 6 para obtener las simulaciones del modelo que en la sección anterior se ha obtenido. Este software posee la herramienta llamada Simulink en donde permite introducir en diagrama de bloques el sistema a simular.

Adicionalmente, permite generar las gráficas en cualquier punto que el diseñador desee mediante la utilización de osciloscopios. En la figura 6.1.1 se muestra el explorador de MATLAB.

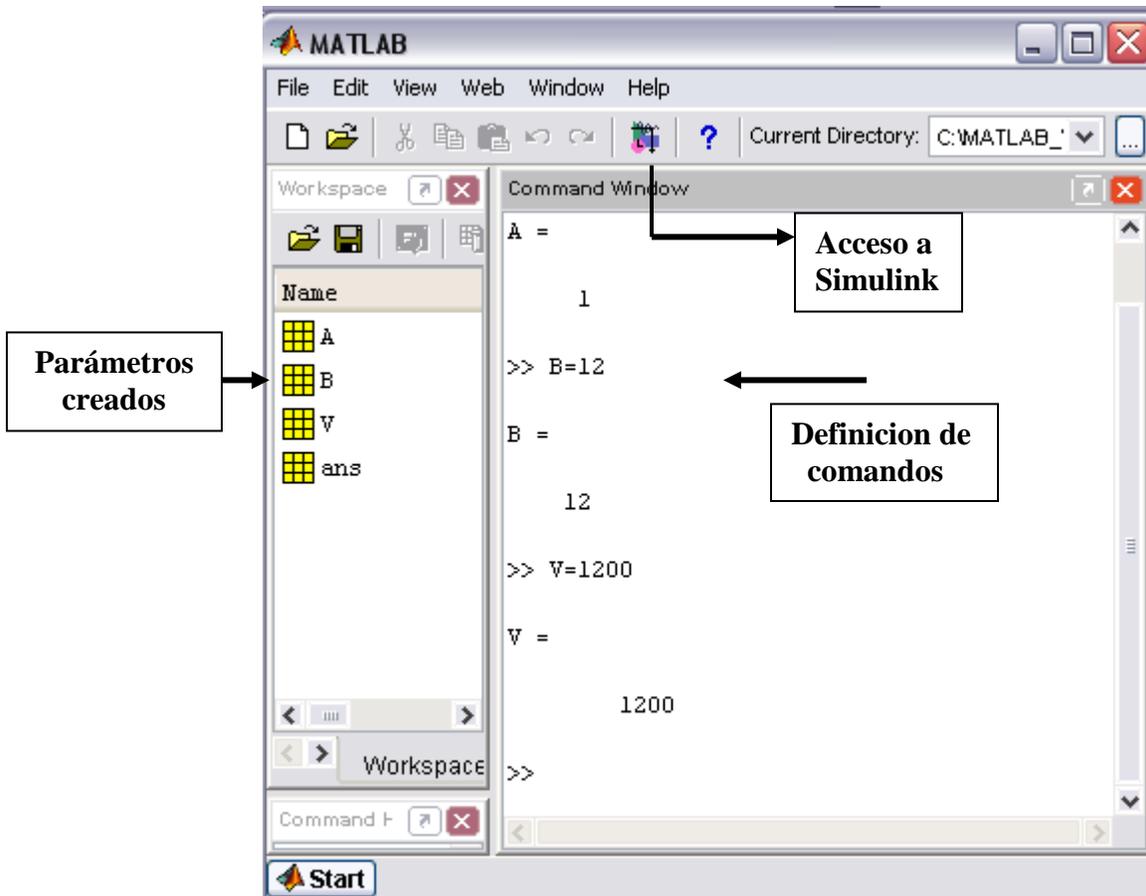


Figura 6.1.1 Espacio de trabajo del software Matlab

De esta manera, en el espacio para la definición de comandos, se introducen los valores de las constantes que serán utilizados en la herramienta Simulink. Una vez definidos los parámetros, se debe de implementar el diagrama de bloques en Simulink. Se debe de acceder esta herramienta mediante un clic en el símbolo , de esta manera se aparece el siguiente cuadro de diálogo:

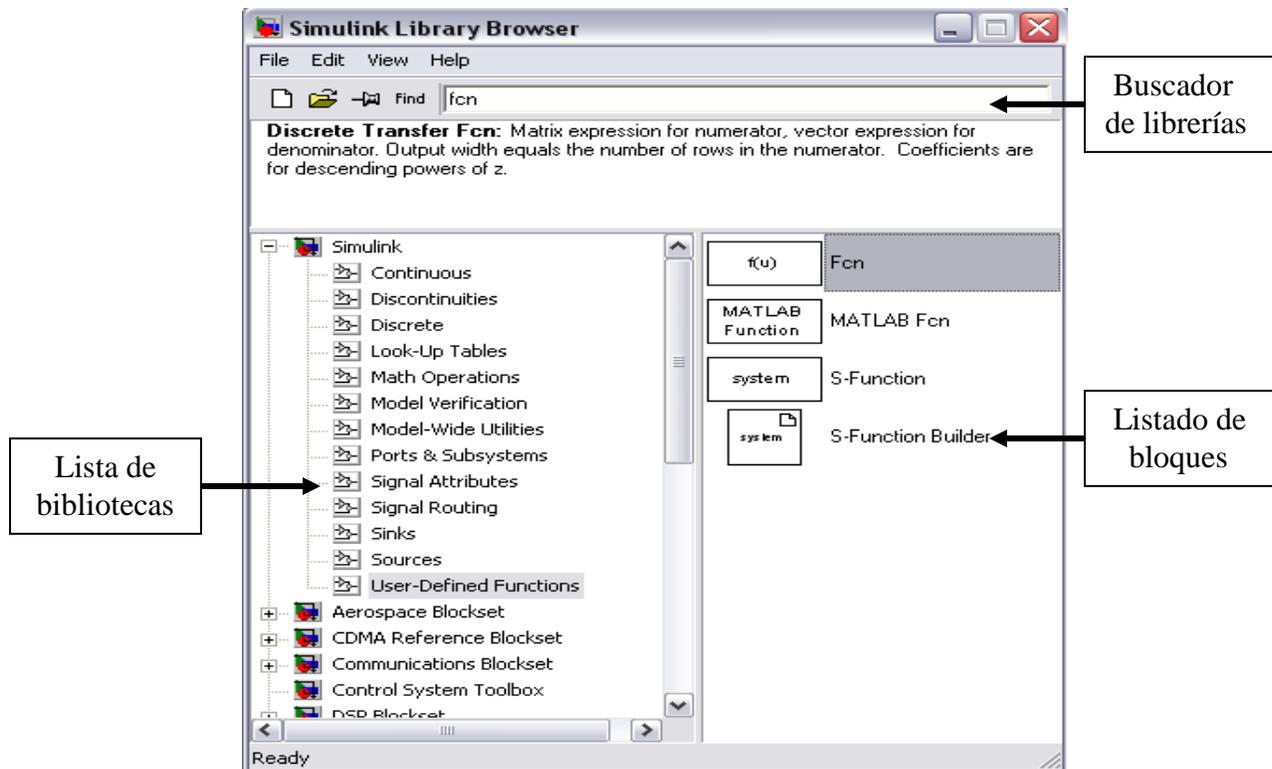


Figura 6.1.2 Cuadro de diálogo para el buscador de librerías de Simulink.

Finalmente, se crea un espacio para que el diseñador implemente el sistema a controlar. Mediante las conexiones entre bloques y a través de osciloscopios se puede obtener las gráficas características del sistema. Así es como se obtuvo el diagrama obtenido final en diagrama de bloques del modelo del sistema que se implementará, mostrado en la figura 6.1.3.

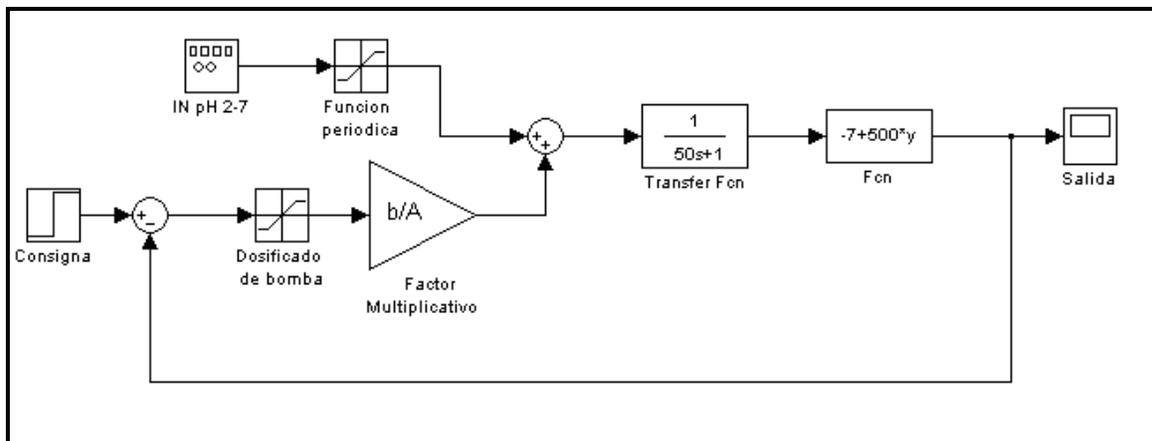


Figura 6.1.3 Espacio de trabajo para implementar el sistema en software Simulink.

Para la simulación se han ingresado los datos mostrados en la tabla 6.1.1.

Tabla 6.1.1 Datos teóricos de simulación en Simulink.

Parámetro	Unidades	Descripción	Valor
A	L/s	Flujo de afluente	20
a	Kg/L	Concentración del afluente	0.001 - 0.0001
B	L/s	Flujo de la bomba dosificadora	Linealización
b	Kg/L	Concentración del efluente.	-0.01
V	L	Capacidad del reactor	1000 L
Consigna	pH	Referencia del sistema	8

Cabe destacar, que se ha supuesto un flujo de entrada constante de 20 Litros por segundo que es un valor muy aproximado al medido en la Planta de Tratamiento de Sigma. El valor “a” es el valor de concentración de la sustancia de entrada. Se pretende introducir una señal periódica que oscile entre pH=3 y pH=5 para observar la salida del sistema. Se utilizó la siguiente ecuación para dicho cálculo:

$$y = 10^{-pH} - 10^{(pH-14)} \quad (6.1.1)$$

De la ecuación (6.1.1) se ha obtenido que para un valor de pH igual a 3, la concentración es de 0.001, mientras que para un pH igual a cinco es de 0.0001. De este modo, la señal periódica ($f = 0.005Hz$) de entrada para la simulación se presenta en la figura 6.1.4.

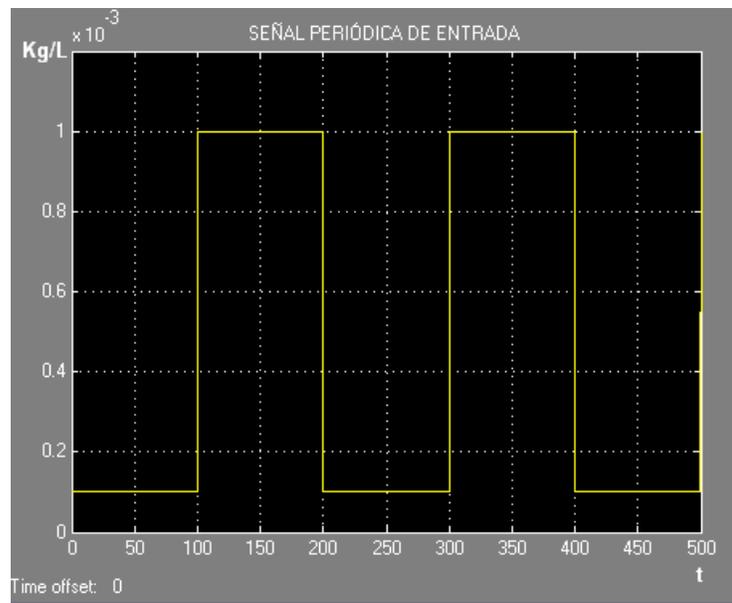


Figura 6.1.4 Señal periódica de entrada para la simulación del sistema sin compensador

Con el diagrama de bloques implementado en la figura 6.1.3 y los valores tomados de la tabla 6.6.1 se ha obtenido la grafica correspondiente a la salida del sistema. En la figura 6.1.5 se muestran los resultados con linealización y sin ella para mostrar la importancia de la misma. Nótese que dicha gráfica al no poseer compensador toma una respuesta característica de primer orden (línea morada), tal y como se espera según el modelo del sistema ya encontrado.

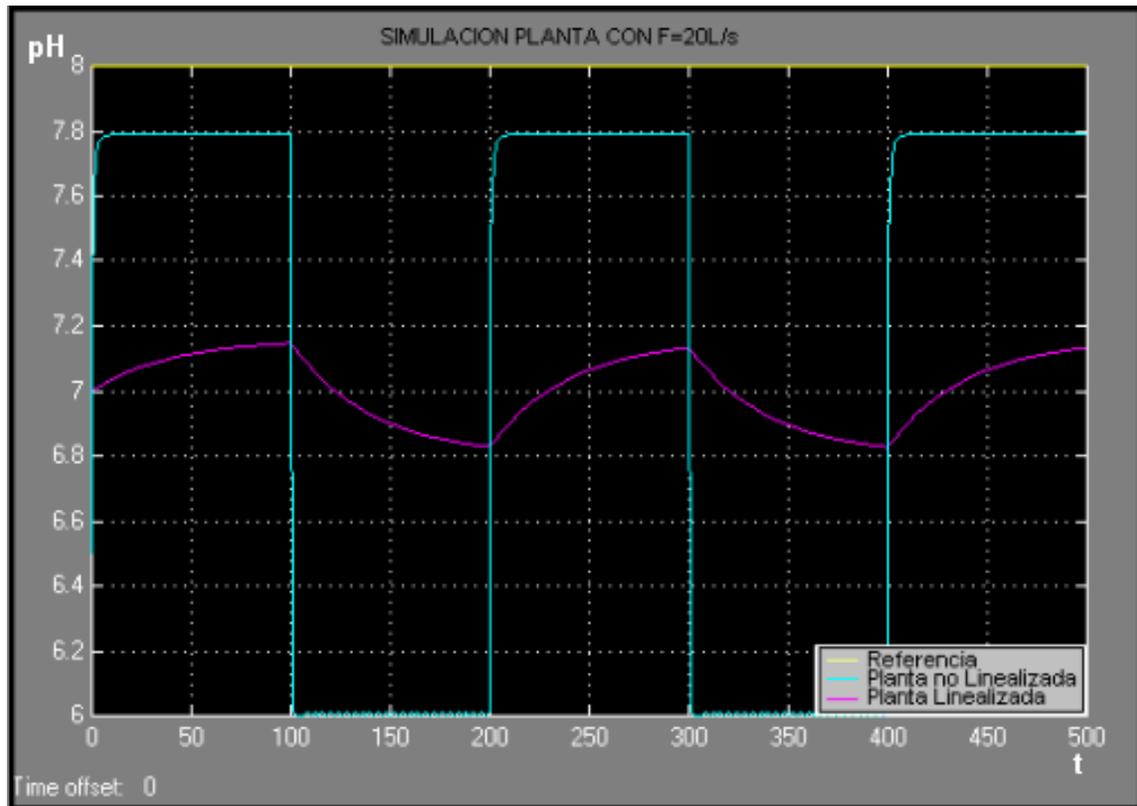


Figura 6.1.5 Respuesta del modelo del sistema a implementar sin compensador.

6.2 Diseño del compensador PI.

Una vez obtenido la respuesta del modelo de la planta, se debe encontrar el compensador que regule la señal de la salida ante diferentes perturbaciones en la entrada del sistema.

En la presente sección se presenta las técnicas a emplear para diseñar sistemas de control realimentados.

Controlador PID.

Para diseñar un controlador PID se debe de conocer muy bien el sistema debido a que hay que hallar los parámetros del mismo.

El regulador PID puede descomponerse en reguladores: proporcional, derivativa e integral para su aplicación de acuerdo a las necesidades de diseño [6].

Regulador proporcional: modifica la salida en función del valor del error en forma proporcional. A mayor error de salida con mayor velocidad cambia la salida del regulador. En el caso de la regulación de pH la señal de salida se aproxima a la deseada a través de una función logarítmica.

Regulador Integral: este tipo de regulación integra el error generado, de tal manera que si la salida ha estado por debajo de la consigna durante mucho tiempo, el error integrado aumenta, por lo que la salida tiende a la referencia más rápidamente. Cuando la salida intenta alcanzar el valor deseado, seguirá aumentando a fin de volver a integrar nuevamente el error pero esta vez de signo inverso al anterior, obteniendo como resultado una serie de amortiguaciones cada vez menores.

Regulador derivativo: su función es derivar el error, es decir, la tendencia de éste para disminuir significativamente la respuesta del sistema.

Para nuestro caso, al tener un sistema de primer orden se diseña un controlador tipo PI; con el objeto de compensar la variación de la salida del sistema con respecto a una entrada de perturbación existente como lo es la solución ácida del afluente en la producción de yogurt y quesos.

A nivel de diagrama de bloques el controlador PI a diseñar se ubica para corregir el error producido entre la consigna o referencia de control y el valor de pH que el sensor obtiene en tiempo real. En la figura 6.2.1 se muestra el esquema de control que se implementa.

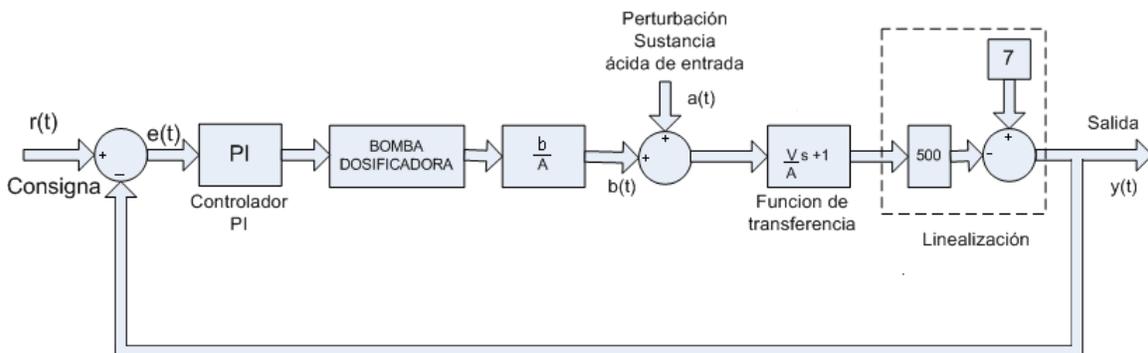


Figura 6.2.1 Diagrama de control implementado con controlador PI.

La función de transferencia de un controlador PI es [5]:

$$T(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

$$T(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (6.2.1)$$

Para encontrar los parámetros del controlador PI es necesario encontrar la ecuación característica. Para tal objetivo, se toma en cuenta la figura 6.2.1. La función de transferencia a lazo cerrado se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{y(t)}{r(t)} = \frac{\left(\frac{K_p s + K_i}{s} \right) \frac{b}{A} \left(\frac{1}{\frac{V}{A}s + 1} \right) (-500)}{1 + \left(\frac{K_p s + K_i}{s} \right) \frac{b}{A} \left(\frac{1}{\frac{V}{A}s + 1} \right) (-500)}$$

Reduciendo la ecuación anterior, se tiene:

$$\frac{y(t)}{r(t)} = \frac{\frac{-500}{V} [K_p s + K_i] b}{s^2 + \left(\frac{A}{V} - \frac{500}{V} K_p b \right) s - \frac{500}{V} K_i b} \quad (6.2.2)$$

Tomando de referencia la ecuación 6.2.2 se tiene que el denominador corresponde a la ecuación característica del modelo mostrado en la figura 6.2.1, y posee la siguiente manera:

$$D(s) = s^2 + \left(\frac{A}{V} - \frac{500}{V} K_p b \right) s - \frac{500}{V} K_i b \quad (6.2.3)$$

El sistema debe cumplir con las condiciones de estabilidad. Utilizando el criterio de ROUTH-HURWITZ, el cual lleva a encontrar los valores de las constantes K_p y K_i , se tiene lo siguiente:

	s^0	s^1
1	1	$-\frac{500}{V}K_i b$
2	$\frac{A - 500bK_p}{V}$	0
3	$-\frac{500}{V}K_i b$	0

Las condiciones de estabilidad generan los siguientes resultados:

Constante proporcional:

$$\frac{A - 500bK_p}{V} > 0 \quad (6.2.4)$$

$$K_p > \frac{A}{500b}$$

Constante integral:

$$-\frac{500}{V}K_i b > 0$$

$$K_i > 0 \quad (6.2.5)$$

El método de igualación de polinomios genera una manera rápida y útil para garantizar el comportamiento de la señal de salida con respecto a las necesidades de la planta. Se considera una ecuación característica con las condiciones deseadas por:

$$D_{IDEAL}(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (6.2.6)$$

Igualando los polinomios de las ecuaciones 6.2.3 y 6.2.6, se obtienen los siguientes resultados:

$$2\zeta\omega_n = \frac{A}{V} - \frac{500}{V}K_p b$$

De esta manera se obtiene:

$$K_p = \frac{A - 2\zeta\omega_n V}{500b} \quad (6.2.7)$$

Adicionalmente:

$$\omega_n^2 = -\frac{500}{V} K_i b$$

$$K_i = \frac{-\omega_n^2 V}{500b} \quad (6.2.8)$$

De esta manera, las ecuaciones 6.2.7 y 6.2.8 cumplen con el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz y que el polinomio característico responda como se desea.

En la figura 3.3.1 se muestra el comportamiento deseado y describe la siguiente curva:

$$\frac{K * \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6.2.9)$$

A continuación se presentan las ecuaciones que serán utilizadas para hallar las constantes del compensador PI.

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (6.2.10)$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left(\frac{\ln M}{\pi}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\ln M}{\pi}\right)^2}} \quad (6.2.11)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (6.2.12)$$

La reacción química entre ácidos y bases fuertes (como la soda cáustica utilizada de neutralizador con pH igual a 12 en concentración 0.01 mol/L) inicia inmediatamente.

Para efectos del criterio de diseño, se ha recomendado por los ingenieros de Sigma que el tiempo para alcanzar el punto máximo del sistema sea de 12 segundos y parte del diseño contempla un sobreimpulso máximo igual 0.5.

De esta manera de la ecuación 6.2.10 se tiene que $\omega_d = 0.2618$. Sabiendo que el sobreimpulso máximo es de 0.5 unidades, y despejando ζ de la ecuación 6.2.11, obtenemos que $\zeta = 0.2155$. Además, con estos dos valores se puede obtener de la ecuación 6.2.12 que $\omega_n = 0.2681$

Reemplazando los valores obtenidos, se sustituyen en la ecuación 6.2.6, para obtener la ecuación del polinomio característico de la siguiente manera:

$$D(s) = s^2 + 0.115s + 0.072 \quad (6.2.13)$$

De acuerdo a las ecuaciones 6.2.7 y 6.2.8 se deduce:

$$K_p = \frac{A - 2\zeta\omega_n V}{500b} = \frac{20 - 2(0.2155)(0.2681)(1000)}{500(-0.01)} = 19.11$$

$$K_i = \frac{-\omega_n^2 V}{500b} = \frac{-(0.2681)^2 1000}{500(-0.01)} = 14.37$$

Manteniendo una referencia de pH igual a 8 se tiene la siguiente respuesta en el software Simulink.

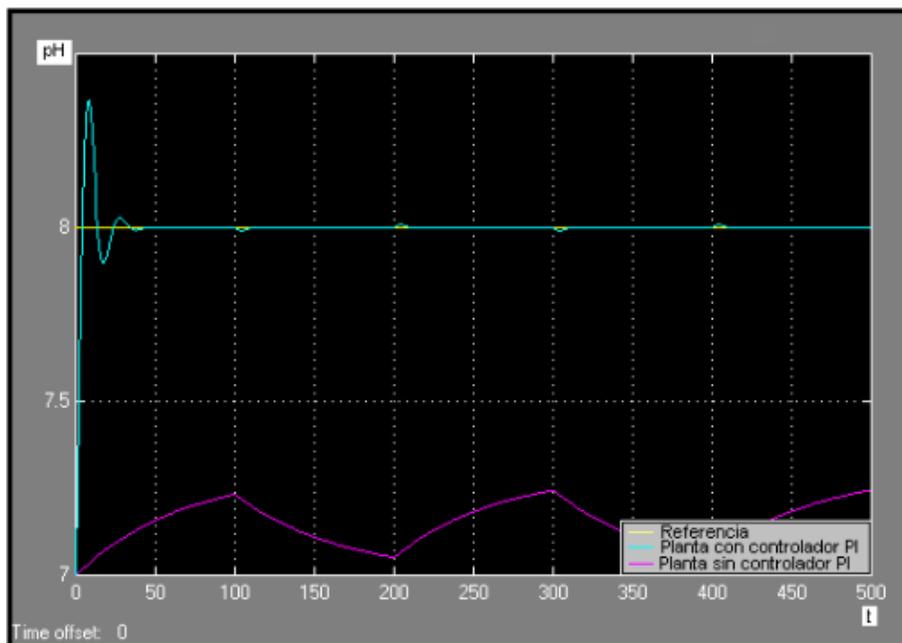


Figura 6.2.2 Respuesta del sistema con y sin controlador PI.

Una vez implementado el sistema, conformado por el sensor de pH, microcontrolador, bomba dosificadora de base y válvula, se procede al monitoreo del pH mediante el software SCADA. Al igual que la simulación obtenida en la sección 6.1, la consigna del controlador se establece en un valor de pH igual a 8. Dicho valor no es arbitrario. Es un valor que garantiza que en la salida de la Planta de Tratamiento el pH se encuentra dentro del rango establecido para no impactar el entorno del mismo.

En un principio se consideró establecer un valor de pH igual a 7. Sin embargo, este valor neutro produciría una histéresis entre oscilaciones del fluido entre cambios constantes de valores menores y mayores a 7 que generan comportamiento ácido y básico en dicho fluido y no es deseable. De esta

manera, si se establece en un valor mayor, no se genera ese comportamiento, es decir, el fluido posee un comportamiento básico constante a partir de esta etapa.

Para la toma de datos en forma experimental, se esperó a que el agua desgrasada alcanzara niveles de pH realmente ácidos, tales como en la simulación. De esta manera, cuando el pH posee un valor de aproximadamente un nivel de 3, se logró tomar los datos de la planta con compensador PI. Para la toma de mediciones, se programa en el PLC una lógica de adquisición de datos del sistema cada 2.5 segundos, los cuales son tabulados como se muestra en la tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1 Valores obtenidos en el PLC con el controlador implementado cada 2.5 segundos.

Muestra	Tiempo(s)	Valor de pH
1	0	3.54
2	2.5	3.62
3	5	3.86
4	7.5	4.01
5	10	4.74
6	12.5	8.51
7	15	8.28
8	17.5	7.85
9	20	7.97
10	22.5	8.22
11	25	8.18
12	27.5	8.19
13	30	8.09
14	32.5	7.92
15	35	8.17
16	37.5	8.05
17	40	8.11

A partir de la tabla anterior, se pueden tomar los valores experimentales en el dominio del tiempo que se obtuvieron. Sin embargo, en la figura 6.2.3 se integran los resultados experimentales y teóricos a través del software Simulink de Matlab.

De esta manera, el sobrepaso máximo corresponde a la resta del nivel de pH en estado estacionario, es decir un nivel de 8, con el nivel máximo alcanzado por el sistema que en este caso es de 8.51 a los 12.5 segundos. Esto garantiza un sobrepulso de 0.51. Para el valor de estado estable, se está considerando, como criterio de diseño, el promedio de los valores de pH luego de alcanzar su tiempo de estabilización, cuyo resultado es un valor en estado estable correspondiente a 8.1. El tiempo de sobrepaso es el correspondiente a aquel en donde ocurre el sobrepulso máximo de pH. Para nuestro caso, posee un valor de 12.5 segundos.

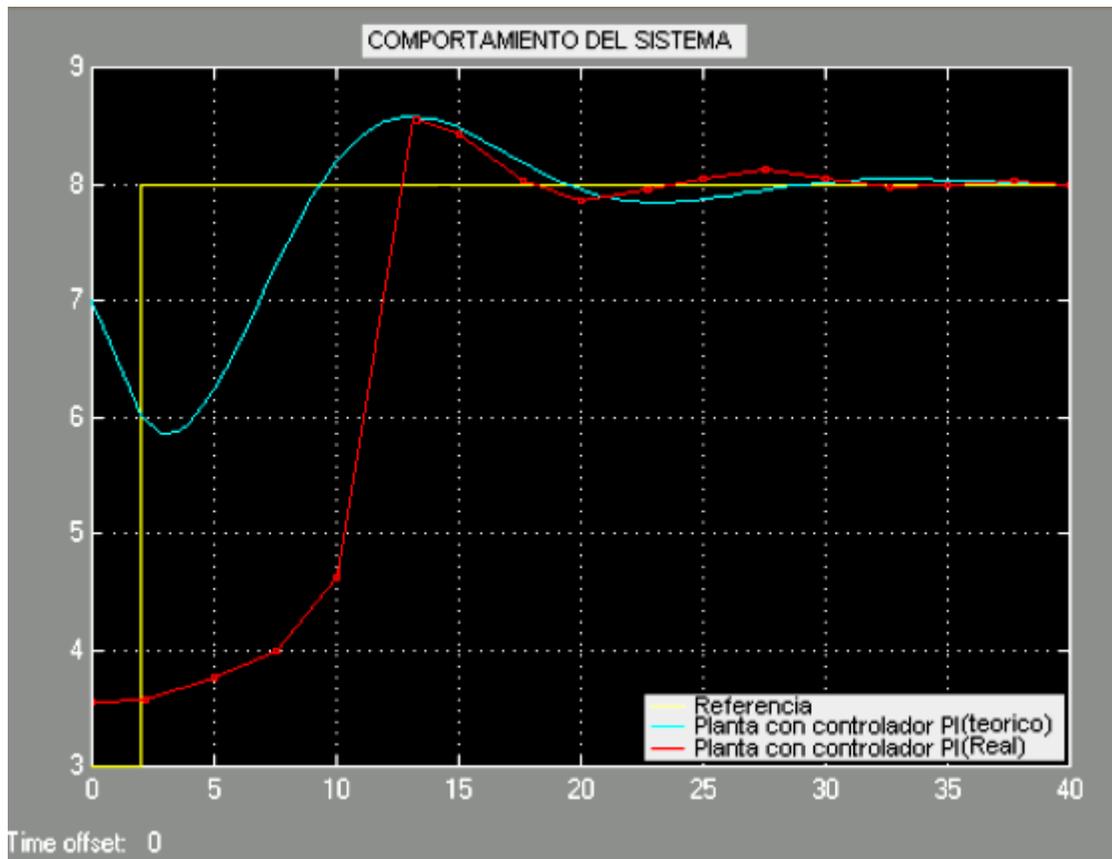


Figura 6.2.3 Curvas teórica y experimental obtenidos a la salida del sistema de control

De esta manera, se pueden comparar los resultados teóricos versus los experimentales. En la tabla 6.2.2 se muestran los porcentajes de error que dan validez a los objetivos específicos de este proyecto.

Tabla 6.2.2 Porcentajes de error de parámetros en el dominio del tiempo.

Parámetro en el dominio de tiempo	Valor teórico	Resultado experimental	Porcentaje de error
Sobrepaso máximo	0.5	0.51	1.17
Valor en estado estable	8	8.1	1.25
Tiempo de sobrepaso	12	12.5	4.16

En el diseño del controlador se estableció un tiempo de 12 segundos para alcanzar el sobreimpulso del sistema, en los resultados está ocurriendo a los 12.5 segundos, siendo el parámetro que posee mayor porcentaje de error. Esto se debe principalmente a que la sustancia utilizada como base no posee un valor de pH de 12 exacto, sino que la medición muestra un valor de pH cercano 11.8 en el momento de tomar las muestras. Adicionalmente, existe un retardo para que la mezcla del reactor se homogenice y la medición sea estable. Esta función la cumple el motor soplador ubicado dentro del reactor.

Nótese que el compensador responde según las especificaciones de diseño en cuanto al parámetro de sobreimpulso, el cual es definido como la diferencia entre el punto máximo y el valor en estado estable. La curva experimental se compone de muestras cada 2.5 segundos. Se escoge este tiempo de muestreo de la señal puesto que el objetivo es solamente de graficación.

En cuanto al valor de estado estable, nótese que en el estado estacionario tanto el valor teórico como el real tienden al mismo valor a través del tiempo. Este valor es el definido por el usuario a través de las pantallas de configuración del software SCADA y que por defecto posee un valor de 8, cuyo valor es recomendado por especialistas.

Con los valores obtenidos en la tabla 6.2.2, se procede a obtener los parámetros para hallar la ecuación característica experimental:

$$w_d = \frac{\pi}{T_p} = 0.251$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left(\frac{\ln M}{\pi}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\ln M}{\pi}\right)^2}} = 0.2096$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = 0.2567$$

Con los resultados anteriores la ecuación característica experimental queda de la siguiente manera:

$$D_{IDEAL}(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 =$$

$$= s^2 + 0.1075s + 0.066$$

Con este resultado se procede a calcular las constantes experimentales del controlador PI, a partir de las ecuaciones 6.2.7 y 6.2.8.

$$K_p = \frac{A - 2\zeta\omega_n V}{500b} = 17.52$$

$$K_i = \frac{-\omega_n^2 V}{500b} = 13.18$$

Esto implica un porcentaje error de la constante de proporcionalidad de un 8.3%, mientras que un error de constante integral de un 8.28%, lo cual es menor que un 10% definido en los objetivos específicos.

EL fin del proyecto es obtener un nivel de pH igual a 8 en la etapa final del tratamiento primario para garantizar un nivel de pH constante y cercano a ese valor en el líquido efluente. En la tabla 6.2.3 se muestra la tabla correspondiente a la medición tomada por un sensor de pH colocado al final del proceso, cuyos datos se recolectan a través de la utilidad "Datalog" de RSView32 la cual permite el almacenamiento y adquisición de datos. La generación de históricos es posible gracias a la captura de nivel de un sensor de pH colocado a la salida de la Planta de tratamiento.

Tabla 6.2.3 Valores de pH en la salida del efluente con el compensador implementado.

Tiempo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Valor de pH	7,80	7,75	7,80	7,85	7,85	7,89	7,95	7,96	8,01	8,01	8,05	8,1	8,11	8,11	8,16

Tiempo	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Valor de pH	8,1	8,16	8,17	8,25	8,36	8,29	8,33	8,28	8,25	8,26	8,29	8,34	8,3	8,3	8,32

Tiempo	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Valor de pH	8,33	8,35	8,26	8,35	8,34	8,35	8,35	8,36	8,4	8,32	8,32	8,28	8,27	8,1	8,1

Tiempo	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Valor de pH	8,0	7,96	7,95	7,96	7,97	8,02	8,1	8,11	8,2	8,21	8,22	8,2	8,2	8,24	8,24

Los resultados de la tabla anterior se esbozan en la gráfica mostrada en la figura 6.2.4, en donde se visualiza la constancia de la medición de pH en un valor cercano a 8. Los resultados son los esperados debido a que las oscilaciones se encuentran cercanas al valor definido, tal y como lo verifica las mediciones. Las variaciones son justificables debido al comportamiento logarítmico del pH, adicionado a que la sustancia base no posee pH de 12 exactos, flujos aproximados, etc que se suponen en el diseño del compensador. Esto supone que la meta del proyecto ha sido cumplida satisfactoriamente al producirse un pH constante en la salida del sistema.

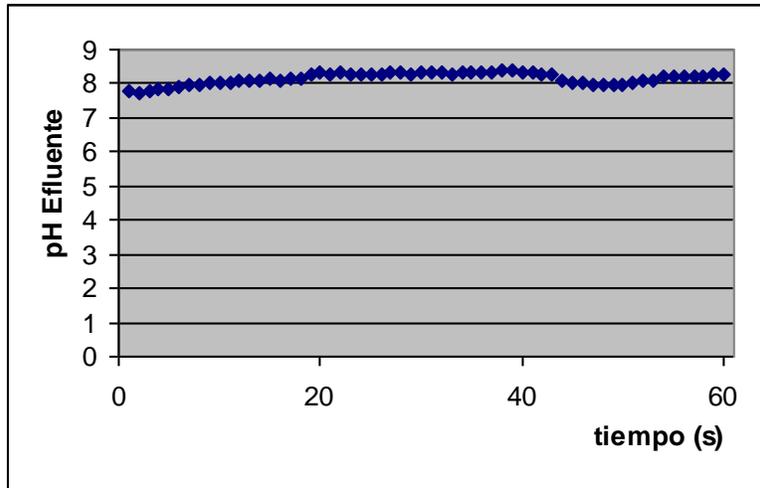


Figura 6.2.4 Gráfica obtenida a la salida de la Planta de tratamiento con controlador

Nótese que el valor de pH en la salida del efluente permanece con carácter básico a través del tiempo. El proyecto consiste en proporcionar a Sigma Alimentos de un control de pH automática capaz de mantener un nivel de pH constante a la salida del proceso o efluente. Con este resultado, se está dando por satisfecho el cumplimiento de la meta.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. Un controlador clásico PI, continuo presentó un comportamiento satisfactorio debido a que la planta es de primer orden. Se realizó mediante el método de igualación por polinomios que garantiza una respuesta deseada a partir del tiempo de sobreimpulso (T_p) y sobreimpulso máximo (M_p).
2. El estudio detallado genera un modelo flexible ya que puede funcionar en otras plantas de tratamiento o sistema de neutralización de pH, debido a que se sustituirían por otros nuevos valores de K_I y K_p según las características propias del sistema y de los criterios de diseño del compensador.
3. Las simulaciones realizadas en Matlab (Simulink) dan una perspectiva clara del comportamiento de la planta así como de los elementos que la afectan o perturbaciones, considerándolo un método útil en el diseño y a partir de estos resultados determinar las características de los equipos por seleccionar.
4. La implementación del sistema de control en un PLC genera confiabilidad en el sistema debido a que la programación en escalera ofrece versatilidad al facilitar modificaciones posteriores según requerimientos de la empresa Sigma Alimentos.
5. Las simulaciones facilitaron el montaje del sistema y generaron resultados óptimos en la puesta en marcha. El valor final fluctúa entre 7.98 y 8.28 (ver tabla 6.1.1). La respuesta del sistema real y teórico es similar. Las diferencias radican en la influencia de caudales, sedimentos, grasas y valores inexactos de sustancia base.

7.2 Recomendaciones

1. Los sensores de pH siempre deben estar sumergidos, ya que el calor puede secar la sustancia de referencia que utiliza internamente.
2. El limpieza del sensor de pH debe realizarse continuamente (al menos una vez a la semana) con el objetivo de brindarle mantenimiento a la cabecilla del mismo.
3. Es importante proteger las bombas para evitar la succión al vacío. Esto se realiza mediante la instalación de sensores de nivel en el tanque donde se almacena la sustancia base.
4. Revisar continuamente la medición del sensor en el sistema SCADA para corroborar mediciones dentro del rango especificado. Es conveniente poseer un phmetro manual con el objeto de garantizar una lectura correcta del sensor.

Bibliografía

[1] Amaya Fabián Amaya, Cañon Oscar, Aviléz Oscar. **PH Control Systems**. (En línea) Consultada: 4 de diciembre de 2008. Disponible en: http://www.umng.edu.co/www/resources/rev14_9.pdf

[2] Chang Raymond, **Química**, Cuarta Edición, Editorial Mc Graw Hill.

[3] Decreto Ejecutivo Canon Ambiental por Vertidos. Memoria (2005): Foro problemática ambiental de los vertidos en Costa Rica. Programa CAMBIOS-CIMH-PRIGA.

[4] Kuo, Benjamín C. **“Sistemas de control automático”**, 5ª Ed. Prentice-HALL HISPANOAMERICANA , 1996, México

[5] Ogata, Katsuhiko. **Ingeniería de Control Moderna**, Pearson, Prentice Hall, 2003, 4ta Edición, Madrid.

[6] Ortíz León, G. “Control Automático”. Consultada: 6 de agosto del 2008. (En línea). Disponible en: http://www.ie.itcr.ac.cr/gaby/Licenciatura/Control_Automatico/Presentaciones/

[7] Pearson Ralph. **Ácidos y bases duros y blandos**. Primera Parte, Principios Fundamentales.

[8] Potter, Wigget. **Mecánica de fluidos**, Editorial Prentice Hall. Año de edición 2001.

[9] Productos y servicios para la Industria del Agua Latinoamericana. ¿Qué es el pH? (En línea) Consultada: 10 mayo del 2009. Disponible en: http://www.aguamarket.com/sql/temas_interes/198.asp

[10] R.S.Ramalho. **Tratamiento de aguas residuales**. Editorial Reverté. (En línea) Consultada: 4 de febrero del 2009. Disponible en: http://books.google.co.cr/books?id=30etGjzPXyWC&pg=PA380&lpg=PA380&dq=Reactor+de+flujo+continuo+y+mezcla+completa&source=bl&ots=OztaJYeEj8&sig=P-RdRe7fBW1aGlqvGgLTZBzPTEM&hl=es&ei=NeIUSvmLLYKtge-5IT0DA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1#PPA3,M1

[11] Robert Murria, Harper. **Bioquímica**. Editorial El manual moderno. Año de edición 2003.

[12] Rockwell Automation. “Literature Library”. Consultada: 4 de agosto de 2008. (En línea) Disponible en: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/public/documents/webassets/browse_category.hcst

- a. Pub. No. 1763-UM001B-EN-P Micrologix 1100 User Manual.
- b. Pub. No. 1763-RM001B-EN-P Micrologix 1100 Instruction Set.
- c. Pub. No. 1762-IN005A-US-P Micrologix Analog Input/Output Module.
- d. Pub. No. vm32-um001_-en-e.pd RSView32 User Guide.

[13] Rohrs, Melsa, Schultz. **Sistemas de control lineal**. Editorial Mc GrawHill. Segunda Edición. 2002.

[14] Romero Rojas, Jairo Alberto. **Tratamiento de aguas residuales**. (Teoría y Principios de Diseño), Editorial Escuela de Ingeniería. 2005.

Apéndices

A.1 Glosario

Afluente: es el líquido que entra a una planta de tratamiento proveniente de la unidad de proceso.

Anaerobio: libre de oxígeno.

Coagulación: Consiste en neutralizar las cargas eléctricas de una suspensión coloidal. De esta manera las partículas coloidales comienzan a agregarse. Entre los productos químicos que suelen utilizarse para favorecer la coagulación de coloides se encuentran: sales de hierro y aluminio tales como: $[(Al_2(SO_4)_3)]$, $[(Fe_2(SO_4)_3)]$, $[FeCl_3]$

Compensador: elemento seleccionado para corregir el comportamiento dinámico de lazo cerrado.

Concentración normal: es igual a la concentración en igual cantidad de materia.

DBO: demanda bioquímica de oxígeno.

DBQ: demanda química de oxígeno.

Dispersión infinita: se refiere a cuando una mezcla se realiza en cada una de las partículas contenidas en un reactor en la misma proporción.

Efluente: en manejo de aguas residuales se refiere al caudal de salida de la última unidad de conducción o tratamiento.

Equilibrio de masa: transferencia de masa de un elemento de fluido infinitesimal.

Floculación: Consiste en la agregación de partículas coloidales previamente desestabilizadas en la etapa de coagulación, formando partículas de mayor tamaño llamados flóculos que permitan su sedimentación.

HMI: Interfaz Humano-Máquina por sus siglas en inglés (Human-Machine Interface).

I/O: Simbología utilizada para hacer referencia a las Entradas y Salidas del PLC.

MATLAB: MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices" es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre las funciones están: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

pH: Unidad de acidez o base de una sustancia.

PID: Proporcional - Integrativo - Derivativo.

PLC: Controlador Lógico Programable (acrónimo del inglés de Programmable Logic Controller).

Regulador: elemento cuyo comportamiento de transmisión se ha seleccionado para modificar su comportamiento dinámico como el estático de lazo cerrado.

SCADA: Control, supervisión y adquisición de datos (acrónimo del inglés de Supervisory Control and Data Acquisition)

Tiempo muerto: retraso en el tiempo que conlleva a modificar la ecuación ya que no se comporta como un polinomio.

A.2 Información sobre la empresa/institución

A.2.1 Descripción de la empresa

AASA es una de las cuatro empresas que forman parte de "Grupo GD de Costa Rica" el cual inició operaciones en el país hace 19 años, con la fundación de GD Ingeniería Eléctrica S.A. por parte del Ing. Giuseppe Daniele. Las cuatro empresas que conforman el Grupo GD de Costa Rica se focalizan en diversas ramas de la Ingeniería Eléctrica y de la automatización, estas son:

- GD Ingeniería Eléctrica S.A: distribuidor autorizado de Schneider Electric.
- AASA, Automatización Avanzada S.A: integrador de sistemas de automatización. Solution Provider de Allen Bradley.
- CODIEL, Consultoría y Diseño Eléctrico S.A: Servicios especializados en el área de alta potencia.
- IMESA, Ingeniería y Materiales Eléctricos S.A: Trabajos electromecánicos y diseño de potencia en el sector de Guanacaste

Por su parte, AASA específicamente se desarrolla en el área de la automatización de los procesos industriales para los diferentes tipos de Industria, cubriendo necesidades de integración de sistemas, control e información, según sea necesario.

A.2.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto

El proyecto se realizó en el “Departamento de Desarrollo de Proyectos”. AASA posee un proceso para la asignación de proyectos. Cuando el departamento de ventas autoriza el inicio del proyecto, el departamento de Desarrollo es el encargado de desarrollarlo e implementarlo según un cronograma de actividades propuesto. Los proyectos son asignados y transferidos a un Ingeniero de proyectos el cual se encarga de la administración del mismo. Este departamento está compuesto por tres Ingenieros y un Coordinador de proyectos. Entre las etapas comunes en el manejo del proyecto se encuentran las siguientes:

- Selección y compra de los equipos a utilizar.
- Diseño de planos eléctricos del gabinete.
- Armado y ensamble del gabinete de control.
- Pruebas al gabinete de control en el taller local para garantizar conexiones.
- Diseño y programación de la lógica de control.
- Diseño y programación de la interface de usuario (HMI o SCADA).
- Simulación de los programas de PLC con software de visualización.
- Instalación del gabinete de control.
- Instalación electromecánica en sitio.
- Comisionamiento de señales de control.
- Puesta en marcha y pruebas de funcionamiento.

A.3 Calibración del sensor de pH

La calibración del sensor se puede realizar de varias maneras descritas a continuación:

1. Con sólo un punto de referencia en forma automática.
2. Con un punto de referencia en forma manual.
3. Con dos puntos de referencia en forma automática.
4. Con dos puntos en forma manual.

A continuación se detalla cada una de las formas de calibración mencionadas.

1. Calibración automática “1 punto” del Sensor de pH utilizando una muestra de control

1. En **Main Menu** seleccione **Sensor Setup**, confirme.
2. Pueden existir varios sensores conectados al SC100, seleccione el adecuado y confirme.
3. Seleccione **Calibrate** y confirme.
4. Seleccione **1 POINT AUTO**. Seleccione el Output Mode (Active, Hold, or Transfer) disponible y confirme.
5. Llevar el sensor a la muestra de control.
6. Cuando se estabilice confirme. El sistema debe desplegar el mensaje “1 Point Auto Complete” y la pendiente de variación en mV/pH.

2. Calibración Manual “1 punto” del Sensor de pH utilizando una muestra de control

1. En **Main Menu** seleccione **Sensor Setup**, confirme.
2. Pueden existir varios sensores conectados al SC100, seleccione el adecuado y confirme.
3. Seleccione **Calibrate** y confirme.
4. Seleccione **1 POINT MANUAL**. Seleccione el Output Mode (Active, Hold, or Transfer) disponible y confirme.
5. Llevar el sensor a la muestra de control.
6. Cuando se estabilice editar el valor de pH de la muestra (definido en un laboratorio) y confirme.
7. El sistema debe desplegar el mensaje “1 Point Manual Complete” y la pendiente de variación en mV/pH.

3. Calibración automática “2 puntos” del Sensor de pH utilizando una muestra de control

1. En **Main Menu** seleccione **Sensor Setup**, confirme.
2. Pueden existir varios sensores conectados al SC100, seleccione el adecuado y confirme.
3. Seleccione **Calibrate** y confirme.
4. Seleccione **2 POINT AUTO**. Seleccione el Output Mode (Active, Hold, or Transfer) disponible y confirme
5. Llevar el sensor a la muestra de control 1. Confirme.
6. Confirme cuando se estabilice.
7. Llevar el sensor a la muestra de control 2. Confirme.

8. Cuando se estabilice confirme. El sistema debe desplegar el mensaje “2 Point Auto Complete” y la pendiente de variación en mV/pH.

4. Calibración manual con “2 puntos” del Sensor de pH utilizando dos muestras de control

1. En **Main Menu** seleccione **Sensor Setup**, confirme.
2. Pueden existir varios sensores conectados al SC100, seleccione el adecuado y confirme.
3. Seleccione **Calibrate** y confirme.
4. Seleccione **2 POINT Manual**. Seleccione el Output Mode (Active, Hold, or Transfer) disponible y confirme
5. Llevar el sensor a la muestra de control 1. Confirme.
6. Cuando se estabilice ajuste el valor de la muestra a la determinada en el laboratorio y confirme.
7. Llevar el sensor a la muestra de control 2. Confirme.

8. Cuando se estabilice ajuste el valor de la muestra a la determinada en el laboratorio y confirme. El sistema debe desplegar el mensaje “2 Point Auto Complete” y la pendiente de variación en mV/pH.

La calibración que se llevó a cabo fue del tipo manual mediante dos muestras llamadas “buffers” con un pH conocido de 7 y 10 mediante el método número 4.

ANEXOS

ANEXO A. Proceso de saneamiento en la Planta de tratamiento de Aguas Residuales de Sigma Alimentos

A.1 Proceso de tamizado grueso

El agua residual entra a este primer proceso, el cual consiste en retener los sólidos más gruesos mediante una rejilla compuesta por platinas de aluminio espaciadas 2.5 cm. Dada las características de las aguas residuales de SIGMA, provenientes de procesos de lácteos, es de esperar que la cantidad de sólidos retenidos en el tamiz grueso sea realmente muy pequeña.

A.2 Tamizado fino

El proceso de tamizado fino se lleva a cabo en un tamiz fino de arco, construido en acero inoxidable. El tamaño de orificio es de 1,0 mm, este tamizado limita la cantidad de sólidos hasta en un 20% del tamizado grueso.

A.3 Regulación / Homogenización

El agua que pasa por el tamiz fino, ingresa luego al tanque de regulación u homogenización. Cuenta con un sistema de aireación de fondo (sopladores y red de difusores de burbuja gruesa) para mantener el agua residual en constante agitación y aireación.

El tanque está equipado con un sistema doble de bombas sumergibles tipo "sewage" marca Grundfos. Una bomba funciona mientras la otra queda de respaldo. Un panel de control alternará los períodos de funcionamiento y de descanso de las bombas.

El sistema de bombeo tendrá capacidad para impulsar $300 m^3$ en 24 horas, esto corresponde a 3,5 litros por segundo.

A.4 Tratamiento primario

El tratamiento primario está constituido por las rejillas (tamizado grueso y fino), tanque de homogenización y el DAF. El tanque de homogenización cumple en parte esta función ya que al mezclar aguas generadas en diferentes procesos, homogenizan sus características, moderando sus variables físico químicas. La homogenización normalmente reduce el consumo de químicos necesarios para ajustar pH en aguas con grandes variaciones como las de esta industria.

Una vez homogenizada, el agua residual es sometida a un proceso químico para neutralizar el efecto de la soda presente en la misma y facilitar así su

coagulación y floculación. Una vez coagulada y floculada, el agua ingresa al DAF. En el DAF, los sólidos suspendidos que han floculado son obligados a flotar por medio de microburbujas de aire. Un mecanismo de desnatado mecánico remueve los sólidos y los deposita en un recipiente de 3 m³ en el que los mismos se terminan de separar del agua y concentrar.

A.5 Sistema de separación de sólidos por flotación DAF

El DAF es un equipo desarrollado específicamente para este tipo de aguas residuales en industrias lácteas, en las que hay gran cantidad de sólidos suspendidos y gran cantidad de grasa presente en el agua. El DAF no sólo es altamente eficiente separando sólidos suspendidos del agua, sino que al hacerlo con aire, el lodo resultante tiene un contenido de agua menor que el obtenido en una trampa de grasa convencional.

El DAF envía el agua desgrasada a un foso de bombeo para iniciar el proceso de lodos secundarios. El lodo primario producido se recolecta en una tolva de polietileno (de fabricación Mexicana). En esta, el lodo se termina de separar del agua y se concentra, lo cual hace que se reduzca el volumen de lodo de desecho. El nuevo lodo primario se utiliza como alimento a los criadores de cerdo debido a que cumple con las condiciones de salubridad con índices aceptables de acidez y concentración orgánica.

A.6 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se realiza mediante el empleo de biorreactores aeróbicos como primer tratamiento secundario, seguido de un sistema de lodos activados, el cual va a permitir alcanzar los valores bajos de concentración de DBO solicitados por Sigma en el efluente final. Usualmente se utiliza tecnología anaerobia que despiden olores desagradables, pero no será utilizado debido a la cercanía de vecinos.

La combinación biorreactores-lodos activados es un enfoque innovador en la agroindustria y, muy particularmente, en la industria láctea, dado el creciente reconocimiento y valoración de dos ventajas señaladas: la reducción en el consumo energético y la disminución en el volumen de lodo biológico producido.

Específicamente, se emplearán dos biorreactores en serie, de manera que se alcance un alto porcentaje de remoción de la carga orgánica antes de ingresar al sistema de lodos activados.

El sistema de biorreactores:

Las biorreactores poseen 6 m de alto total cada una y 4.5 m de espesor de material de empaque. Construidas en forma semienterrada. Poseen un sistema de

aireación y mezcla en el fondo y un sistema de aspersión, con aspersores especiales diseñados para este tipo de aplicación, en la parte superior.

El sistema de lodos activados:

El sistema de lodos activados consta del tanque de aireación, los clarificadores, o sedimentadores finales, los digestores de lodos, el sistema de deshidratado de lodos y una caseta de equipos.

El tanque de aireación del sistema de lodos activados fue diseñado con un período de retención hidráulica de más de 72 horas, con el fin de garantizar que se alcance la calidad requerida del efluente, y a la vez, con la idea de que el manejo de mezcla sea más sencillo para el operador.

El sistema de aireación está constituido por discos difusores de fondo con una red de tuberías de PVC y tres sopladores de desplazamiento positivo de 10 Hp cada uno operando y uno más en “stand by”.

Manejo de lodos primarios

Como se expuso antes, dada la alta calidad de los lodos primarios que se han obtenido, son recolectados y recolectados por los criadores de cerdos cercanos a la zona.

Manejo de lodos secundarios

Los lodos secundarios serán sometidos al siguiente tratamiento:

4.1 Digestión aeróbica

4.2 Deshidratación mecánica (filtro prensa)

Los resultados han puesto en evidencia que en el proceso de digestión aeróbica un volumen de $300m^3$ de aguas residuales será necesario deshidratar $10 m^3$ aproximadamente de lodos biológicos digeridos por día, con una concentración de sólidos de 1.5%.

Se ha incluido un sistema de floculación química para agregar floculantes al lodo antes de su bombeo al proceso de deshidratado en el filtro prensa con el fin de mejorar la cantidad de sólidos atrapados en cada ciclo de deshidratado y mejorar la calidad del producto final del filtro prensa.

Estos lodos resultaron un recurso agrícola valioso dado su contenido de nutrientes, sin embargo, poseen niveles de pH variantes que impiden considerarlos como abono. El objetivo de SIGMA es disponerlos en sus propias áreas verdes, o bien, ofrecerlos al sector agrícola.

Eficiencias en el sistema de tratamiento propuesto:

En la tabla A.1 se presentan las eficiencias obtenidas en el sistema de tratamiento. Las eficiencias coinciden con las solicitadas por Sigma, pero tienen la diferencia de que incluyen una biotorre como proceso biológico intermedio que tiene una eficiencia del 60%.

Tabla A.1 Parámetros fluctuantes en el proceso de saneamiento de aguas residuales de Sigma Alimentos.

Parámetros/unidades	Afluente	Efluente DAF	Efluente Final
DBO 5,20 mg/l	12.380	6.560	100
DQO mg/l	26.300	13.680	300
SST mg/l	5.890	1.180	50
G y A mg/l	917	73	20
pH unidades	3 a 6.89	5.9 a 8,5	5,5 a 8,2
Temperatura °C (°)	22 a 27	22 a 27	22 a 27
SSed. ml/l	2,5	<1	<1
Materia flotante			Ausente
SAAM mg/l	≤1 mg/l	≤1 mg/l	≤1 mg/l
DQO soluble mg/l	9.760	6.840	240
DBO 5,20 soluble mg/l	4.650	3.280	68
Cloruro mg/l	2.090	2.100	2.100

ANEXO B. Hojas de datos de los instrumentos utilizados en el sistema de control de pH.

B.1 Sensor de pH

DATA SHEET

Differential pH and ORP Sensors

pH/ORP



Hach Digital pH/ORP sensors are available in convertible (PEEK® or Ryton®), insertion, and sanitary body styles. Three electrodes are used in these sensors to increase measurement accuracy and eliminate sensor ground loops.

Features and Benefits

Differential Electrode Measurement Technique

This field-proven technique uses three electrodes instead of the two normally used in conventional pH sensors. Process and reference electrodes measure the pH differentially with respect to a third ground electrode. The end result is unsurpassed measurement accuracy, reduced reference junction potential, and elimination of sensor ground loops. These sensors provide greater reliability, resulting in less downtime and maintenance.

Patented Technology

The former GLI, now a Hach Company brand, invented the Differential Electrode Technique for pH measurement in 1970. The pHDT™ sensor series (U.S. Patent Number 6395158B1, dated May 28, 2002) takes this field-proven technology to a new level.

Replaceable Salt Bridge/Protector

The unique, replaceable salt bridge holds an extraordinary volume of buffer to extend the working life of the sensor by protecting the reference electrode from harsh process conditions. The salt bridge simply threads onto the end of the sensor if replacement is needed.

Built-in Encapsulated Preamp

Encapsulated construction protects the sensor's built-in preamp from moisture and humidity, ensuring reliable sensor operation. The preamp in the pHDT analog sensor produces a strong signal, enabling the sensor to be located up to 1000 m (3280 ft.) from the analyzer.

Durable Body Materials

Both the digital and analog pH and ORP differential sensors feature a durable PEEK® body for chemical compatibility

with most process solutions. For less aggressive solutions, Hach offers a Ryton® sensor in a convertible style for pH and ORP measurement. A sensor with a stainless steel body is available for immersion applications.

Digital Electronics Modules

Sensors are available with integral digital electronics or with a gateway module for high temperature (above 70°C) applications.

Versatile Mounting Styles

Sensors are available in four mounting styles—convertible, insertion, immersion, and sanitary. Please turn to page 5 for more information.

Full Featured "Plug and Play" sc100 Digital Controller

There's no complicated wiring or set up procedures with the Hach sc100 controller. Just plug in any Hach digital sensor and it's ready to use—it's "plug and play."

One or two sensors—Use the sc100 Digital Controller to receive data from up to two Hach digital sensors in any combination.

Communications—Multiple alarm/control schemes are available using three relays and two PID control outputs. Communications use analog 4-20 mA and digital MODBUS®/RS485, MODBUS®/RS232 protocols. (Other digital protocols are available. Contact your Hach representative for details.) Every sc100 controller is equipped with wireless communication through an infrared port.

Data logger—A built-in data logger collects measurement data, calibration, verification points, and alarm history for up to 6 months.

DW - drinking water WW - wastewater municipal PW - pure water / power
IW - industrial water E - environmental C - collections FB - food and beverage



Be Right™

Specifications*

pH Sensors

Most pH applications fall in the 2.5 to 12.5 pH range. A Hach pHD sc Differential pH sensor with the wide-range glass process electrode performs exceptionally well in this range. Some industrial applications require accurate measurement and control below 2 or above 12 pH. In these special cases, please contact Hach Technical Support for further details.

Measuring Range

-2 to 14 pH

Sensitivity

± 0.01 pH

Stability

0.03 pH per 24 hours, non-cumulative

Operating Temperature

Digital Sensor: -5 to 70°C (23 to 158°F)

Analog Sensor with Digital Gateway: -5 to 105°C (23 to 221°F)

Immersion Sensor: 0 to 50°C (32 to 122°F)

Flow Rate

3 m (10 ft.) per second, maximum

Sensor Pressure/Temperature Limits

Digital: 6.9 bar at 70°C (100 psi at 158°F)

Analog: 6.9 bar at 105°C (100 psi at 221°F)

Built-in Temperature Element

NTC 300 ohm thermistor for automatic temperature compensation and analyzer temperature readout

Transmission Distance

100 m (328 ft.), maximum

1000 m (3280 ft.), maximum when used with a termination box

Sensor Cable (integral)

4 conductor cable with one shield and polyurethane jacket; rated to 105°C (221°F); 10 m (33 ft.) standard length

Wetted Materials

PEEK® or Ryton® (PVDF), salt bridge of matching material with Kynar® junction, glass process electrode, titanium ground electrode, and Viton® O-ring seals

(pH sensor with optional HF-resistant glass process electrode has 316 stainless steel ground electrode, and perfluoroelastomer wetted O-rings; consult factory for other available wetted O-ring materials)

ORP (Redox) Sensors

For best ORP measuring results in solutions containing zinc, cyanide, cadmium or nickel, Hach recommends using the pHD sc ORP sensor equipped with an optional gold electrode.

Measuring Range

-1500 to +1500 mV

Sensitivity

± 0.5 mV

Stability

2 mV per 24 hours, non-cumulative

Operating Temperature

Digital Sensor: -5 to 70°C (23 to 158°F)

Analog Sensor with Digital Gateway: -5 to 105°C (23 to 221°F)

Immersion Sensor: 0 to 50°C (32 to 122°F)

Flow Rate

3 m (10 ft.) per second, maximum

Sensor Pressure/Temperature Limits

Digital: 6.9 bar at 70°C (100 psi at 158°F)

Analog: 6.9 bar at 105°C (100 psi at 221°F)

Built-in Temperature Element

NTC 300 ohm thermistor for analyzer temperature readout only—no automatic temperature compensation necessary for ORP measurement

Transmission Distance

100 m (328 ft.), maximum

1000 m (3280 ft.), maximum when used with a termination box

Sensor Cable (integral)

4 conductor cable with one shield and polyurethane jacket; rated to 105°C (221°F); 10 m (33 ft.) standard length

Wetted Materials

PEEK® or Ryton® (PVDF), salt bridge of matching material with Kynar® junction, glass and platinum (or plastic and gold) process electrode, titanium ground electrode, and Viton® O-ring seals

*Specifications subject to change without notice.

B.2 Principales características de la bomba dosificadora.

7.0 Keypad/Display: Description and Function

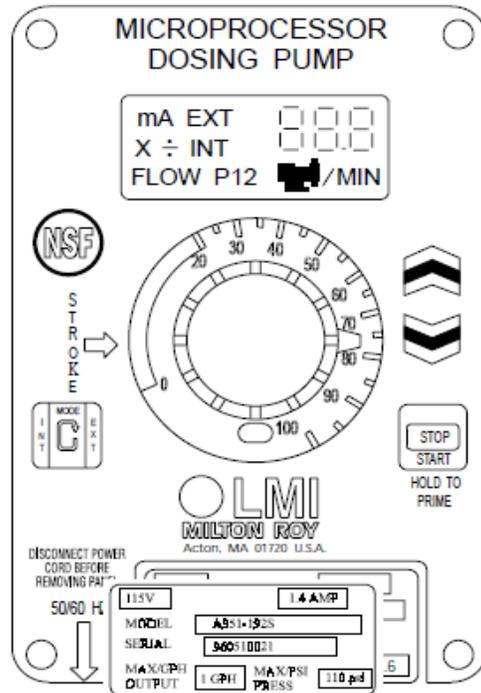


Figure 10: A9 Keypad

7.1 LCD Screen

The LCD screen is the window in which all values and menu choices are displayed (see Figure 11).

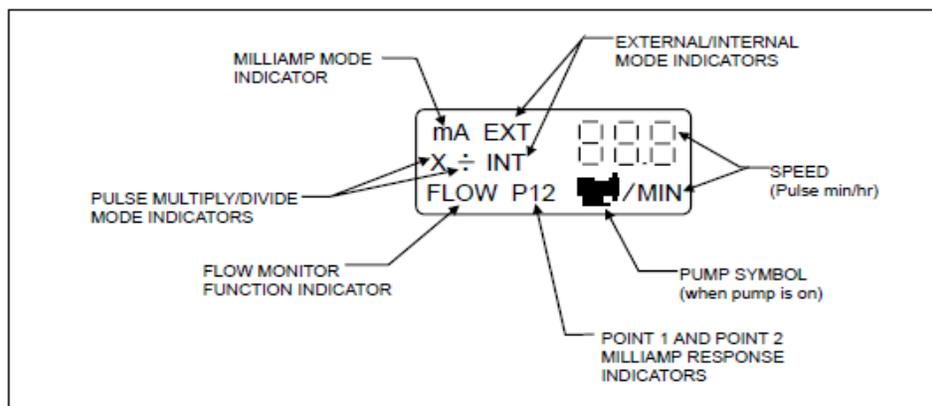


Figure 11: Liquid Crystal Display

9.3 Programming the mA Response

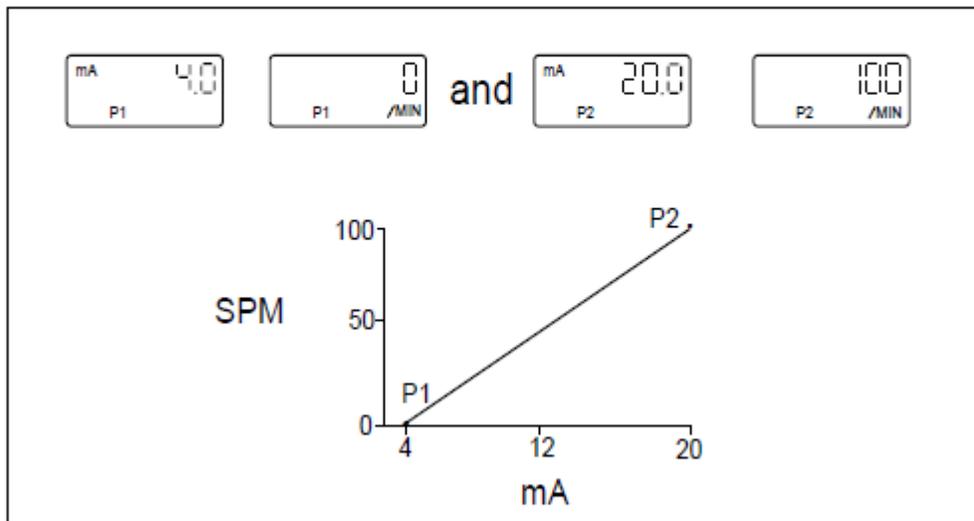
The pump accepts a 0-20 mA or 4-20 mA signal directly. The response to this signal is fully programmable. In the mA mode, the pump speed is determined by the programmed response curve, as defined by points “P1” and “P2.” The factory default set values for P1 and P2 are (4 mA, 0 SPM) and (20 mA, 100 SPM) respectively. This is illustrated in Figure 12.

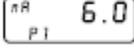
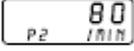
While in the mA mode, the pump speed  and the mA value  are displayed alternately every four (4) seconds while the pump is running.

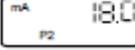
9.4 Programming Points 1 and 2 (SPM)

To program points P1 and P2, first ensure the pump is in the mA mode and OFF. If you wish to program the response in “SPM”, switch to the internal mode. The speed must be set to a SPM value

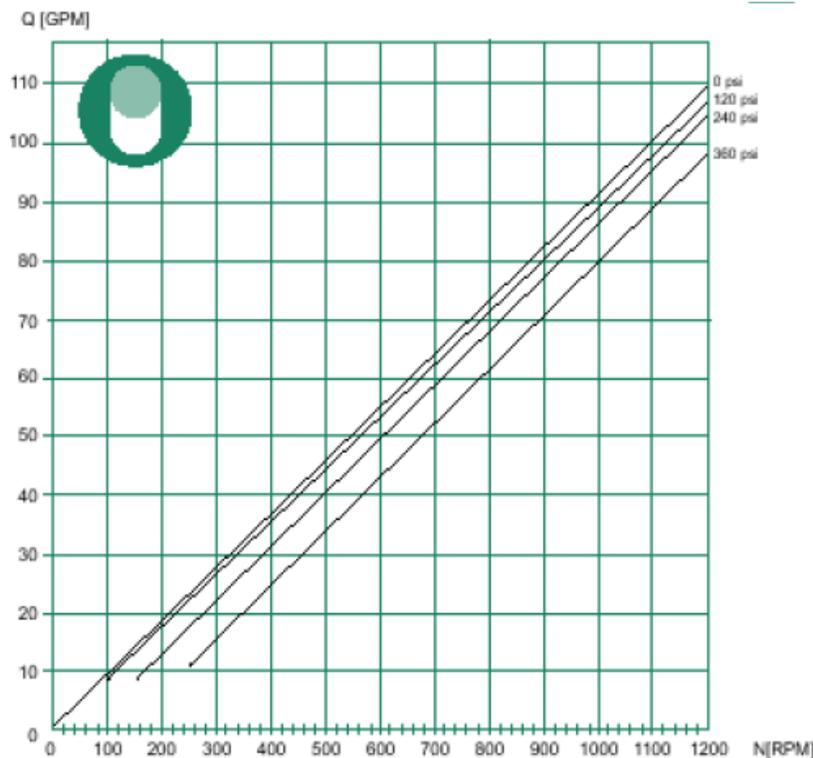
. Return to the External mA mode.



Press either the  (Up) or  (Down) key. The LCD screen will display . After five (5) seconds, the display will show the mA value for P1 . This value may be altered using the  (Up) or  (Down) key within five (5) seconds (i.e. ). Five (5) seconds following the last key press, the stroke rate for P1 will be displayed . This value may be altered within five (5) seconds using the Up or Down key (i.e. ).

Five (5) seconds after the last key press, the mA value for P2 is displayed . Edit as described in the above paragraph (i.e. ). Likewise, five (5) seconds after the last key press the stroke rate for P2 is displayed. Edit as described above (i.e. ).

B.2.1 Curva de dosificación de la bomba.



B.3 Especificaciones del PLC Micrologix1100

Specifications

General Specifications

Description	1763-			
	L16AWA	L16BWA	L16BBB	L16DWD
Dimensions	Height: 90 mm (3.5 in.), 104 mm (4.09 in.) (with DIN latch open) Width: 110 mm (4.33 in.), Depth: 87 mm (3.43 in.)			
Shipping Weight	0.9 kg (2.0 lbs)			
Number of I/O	12 inputs (10 digital and 2 analog) and 6 outputs			
Power Supply Voltage	100...240V ac (-15%, +10%) at 47...63 Hz		24V dc (-15%, +10%) Class 2 SELV	12V to 24V dc (-15%, +10%) Class 2 SELV
Heat Dissipation	See Appendix G .			
Power Supply Inrush Current (max.)	120V ac: 25A for 8 ms 240V ac: 40A for 4 ms		24V dc: 15A for 20 ms	
Maximum Power Consumption	46 VA	52 VA	35 W See Figure on 160.	
24V dc Sensor Power	none	250 mA at 24V dc AC Ripple < 500 mV peak-to-peak 400 µF max.	none	
Input Circuit Type	Digital: 120V ac Analog: 0...10V dc	Digital: 24V dc sink/source (standard and high-speed) Analog: 0...10V dc	Digital: 24V dc sink/source (standard and high-speed) Analog: 0...10V dc	
Output Circuit Type	Relay	Relay	Relay/FET	Relay
Operating Temperature	-20 °C...65 °C (-4 °F...149 °F) ambient			
Storage Temperature	-40 °C...85 °C (-40 °F...185 °F) ambient			
Relative Humidity	5%...95% non-condensing			
Vibration	Operating: 10...500 Hz, 5 g, 0.015 in. max. peak-to-peak, 2 hours each axis Relay Operation: 1.5 g			
Shock, Operating	30 g; 3 pulses each direction, each axis Relay Operation: 10 g			
Shock, Non-Operating	50 g panel mounted (40 g DIN Rail mounted); 3 pulses each direction, each axis			
Terminal Screw Torque	0.56 Nm (5.0 in-lb) rated			
Certification	UL Listed Industrial Control Equipment for use in Class 1, Division 2, Hazardous Locations, Groups A, B, C, D C-UL Listed Industrial Control Equipment for use in Canada CE marked for all applicable directives C-Tick marked for all applicable acts			
Electrical/EMC	The controller has passed testing at the following levels:			

B.4 Especificaciones de la comunicación Ethernet.

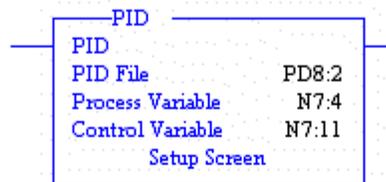
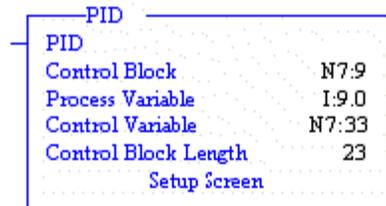
Tabla C.1 Especificaciones principales para la conexión Ethernet.

Tecnología	Velocidad de	Tipo de cable	Distancia	Topología
10Base2	10 Mbps	Coaxial	185 m	Bus (Conector T)
10BaseT	10 Mbps	Par Trenzado	100 m	Estrella (Hub o Switch)
10BaseF	10 Mbps	Fibra óptica	2000 m	Estrella (Hub o Switch)
100BaseT4	100Mbps	Par Trenzado (categoría 3UTP)	100 m	Estrella. Half Duplex (hub) y Full Duplex (switch)
100BaseTX	100Mbps	Par Trenzado (categoría 5UTP)	100 m	Estrella. Half Duplex (hub) y Full Duplex (switch)
100BaseFX	100Mbps	Fibra óptica	2000 m	No permite el uso de hubs
1000BaseT	1000Mbps	4 pares trenzado (categoría 5e ó 6UTP)	100 m	Estrella. Full Duplex (switch)
1000BaseSX	1000Mbps	Fibra óptica (multimodo)	550 m	Estrella. Full Duplex (switch)
1000BaseLX	1000Mbps	Fibra óptica (monomodo)	5000 m	Estrella. Full Duplex (switch)

Tomada de la dirección: <http://es.wikipedia.org/wiki/Ethernet>

B.5 Información del bloque PID para Micrologix 1100

Example of Instruction



Description

This output instruction is used to control physical properties such as temperature, pressure, liquid level, or flow rate of process loops.

The PID instruction normally controls a closed loop using inputs from an analog input module and providing an output to an analog output module as a response to effectively hold a process variable at a desired set point.

The PID equation controls the process by sending an output signal to the actuator. The greater the error between the setpoint and the process variable input, the greater the output signal, and vice versa. An additional value (feed forward or bias) can be added to the control output as an offset. The result of the PID calculation (control variable) will drive the process variable you are controlling toward the set point.

The PID instruction can be operated in the timed mode or the STI mode. In the timed mode, the instruction updates its output periodically at a user-selectable rate. In the STI mode, the instruction should be placed in an STI interrupt subroutine. It then updates its output every time the STI subroutine is scanned. The STI time interval and the PID loop update rate must be the same in order for the equation to execute properly.

Entering Parameters:

PID File - (MicroLogix 1200, 1400 and 1500 only) Specify a [PID file](#). If you have not already defined a PD filetype among your data files, it will be created for you. The file length is fixed at 23 words. The PD file replaces the old integer file control block.

Control Block Length - (Not valid with MicroLogix 1200, 1400 or 1500) Specify an integer file, for example N7:0. The file length is fixed at 23 words.

Process Variable PV - The element address that stores the process input value. This address can be the location of the analog input word where the value of the input A/D is stored. You can also enter an integer address if you choose to pre-scale your input value to the range 0-16383.

Control Variable CV - The element address that stores the PID output. The output value ranges from 0-16383, with 16383 being the 100% "ON" value. This is normally an integer address, so that you can scale the PID output range to the particular analog range your application requires.