



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

INFORME PROFESIONAL

**“AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE FERTIRRIGACIÓN
Y CONTROL DE PH DEL AGUA DE RIEGO PARA PLANTAS
DE BANANO EN INVERNADERO DE SEBIOCA S.A.”**

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

REALIZADO POR:

ING. EDISON LEONIDAS LÓPEZ SANGOLQUÍ

GUAYAQUIL – ECUADOR

2016

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mi madre y a mi esposa.

DEDICATORIA

A mi esposa Noris y a mis hijos, Milca, Caleb e Isaí.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



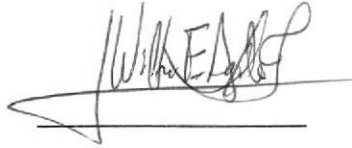
Msc. Sara Ríos

PRESIDENTE



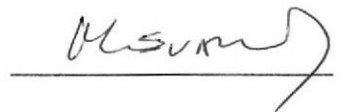
Msc. Efrén Herrera

VOCAL



Ph.D. Wilton Agila.

VOCAL




Msc. Hólger Cevallos

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este informe del proyecto profesional, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de graduación de la ESPOL)



Edison López Sangolquí

RESUMEN

El sistema de fertirrigación es el método más adecuado para realizar una fertilización óptima y respetando el medio ambiente.

En fertirrigación el sistema de riego es utilizado como medio para una dosificación controlada de fertilizantes. Todo esto involucra grandes ventajas y unas pocas desventajas. Entre las ventajas se tiene el ahorro del agua, automatización de la fertirrigación, control del pH, control de dosificación, rentabilidad, optimización del cultivo, aumento de rendimiento y calidad de los frutos. Las pocas desventajas serían el elevado coste inicial, la obturación de goteros como la necesidad de personal entrenado para su manejo.

El control del pH del agua de riego juega un papel importante en los sistemas de fertirrigación. El pH puede afectar al crecimiento vegetal pues afecta tanto a la disponibilidad de nutrientes como al proceso fisiológico de absorción por parte de las raíces y además puede provocar obstrucciones y depósitos en redes de riego y emisores.

En nuestro país la fertirrigación no ha sido muy aplicada y en los pocos casos es frecuente ver sistemas manuales o semiautomáticos. Debido a la falta de automatización los resultados no han sido los esperados y en algunos casos desalentadores.

INDICE GENERAL

	Página
Introducción	1
1. Capítulo 1: Metodología o Solución Tecnológica Implementada	4
1.1 Descripción de la fertirrigación y su infraestructura	3
1.1.1 Ventajas	5
1.1.2 Desventajas	5
1.1.3 Esquema de proceso de fertirrigación	6
1.1.4 Cabezal de riego	8
1.2 Identificación, modelo y control del sistema de fertirrigación	10
1.2.1 Esquema de la Planta a controlar	10
1.2.2 Justificación del control del pH del agua de riego.	14
1.2.3 Identificación del modelo de la planta.	15
1.2.4 Diseño de un controlador clásico PI.	27
1.2.5 Simulación del control PI con respecto al modelo de planta.	34
2. Capítulo 2: Resultados obtenidos	36
2.1 Control de bombeo, control continuo de pH de agua de riego, implementación del algoritmo de control del lazo PI, elaboración de programas para control y monitoreo.	36
Conclusiones y Recomendaciones	40
Biografía	41
Anexos	42

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura. 1.1. Esquema básico de un proceso de fertirrigación.	6
Figura. 1.2. Sistema de inyección accionado eléctricamente.	9
Figura. 1.3. Esquema de la planta a controlar	10
Figura. 1.4. Bomba de riego.	11
Figura. 1.5. Sensor de pH	11
Figura. 1.6. Bomba de inyección y tanque de ácido nítrico.	12
Figura. 1.7. Transmisor de pH	12
Figura. 1.8. Tablero de control con PLC	13
Figura. 1.9. Cañerías por donde se aplica la fertirrigación con control de pH a las plantas de banano.	13
Figura. 1.10. Curvas aproximadas para reducir el pH del agua de riego usando ácido nítrico	15
Figura. 1.11 Aplicación en LabView para la lectura y escalado de pH	16
Figura. 1.12. Onda cuadrada de caudal de color azul de 0 y 40 LPH y respuesta de pH, línea verde	17
Figura. 1.13. Ventana que permite Importar datos.	18
Figura. 1.14. Formato de importación de datos de las señales de entrada y salida de la planta.	18
Figura. 1.15. Llenado de formato de importación de datos de las señales de entrada y salida de la planta.	19
Figura. 1.16. Visualización inicial de los datos importados	19

Figura. 1.17. Visualización gráfica de entrada y salida	20
Figura. 1.18. Selección de un grupo de datos de trabajo o de validación	20
Figura. 1.19. Grupo de datos de trabajo	21
Figura. 1.20. Grupo de datos de validación	21
Figura. 1.21. Modelo Lineal ARX y ARMAX.	22
Figura. 1.22. Modelos estimados en Model View.	22
Figura. 1.23. Modelos de Procesos	23
Figura. 1.24. Modelos estimados	23
Figura. 1.25. Visualizar modelos estimados y mediciones de salida	24
Figura. 1.26. Visualización de comparación de cuatro modelos estimados con mediciones de salida del proceso	24
Figura. 1.27. El modelo seleccionado se transfiere a Workspace	25
Figura. 1.28. Control and Estimation Tool Manager del Sistema.	28
Figura. 1.29. Importar modelo de la planta.	29
Figura. 1.30. Selección de autotuning, PI y Update Compensator	30
Figura. 1.31. Función de transferencia del controlador PI	30
Figura. 1.32. Ajuste adicional mediante especificaciones de Peak Response del 10% y Settling Time de 100s.	31
Figura. 1.33. Resultado del ajuste Peak Response del 10% y Settling Time de 100s.	31
Figura. 1.34. Movimiento manual del cero y la ganancia del controlador.	32
Figura. 1.35. Respuesta al escalón luego del ajuste.	32

Figura. 1.36. Controlador PI con ajustes finales.	33
Figura. 1.37. Exportación del Controlador PI a Worksapce	33
Figura. 1.38. Arquitectura del control.	34
Figura. 1.39. Parámetros del Controlador PI.	35
Figura. 1.40. Respuesta en lazo cerrado a impulso escalón.	35
Figura. 2.1. Estructura del controlador del PLC.	36
Figura. 2.2. Parámetros del Controlador PI (DB41).	37
Figura. 2.3. Parametrización del Controlador PI en operación (DB41).	37
Figura. 2.4. Valores de operación del controlador PI.	38
Figura. 2.5. Pantalla principal en SCADA, slider de ajuste de setpoint.	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos generales de la planta

42

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto profesional fue desarrollado en la empresa SEBIOCA S.A. (Sociedad Ecuatoriana de Biotecnología) que está ubicada en el Campus Politécnico y entre sus actividades está la producción y comercialización de plantas de banano certificadas. Con este fin, posee una infraestructura con laboratorios, invernaderos para cada etapa de crecimiento de las plantas, sistemas de riego y fertilización.

En SEBIOCA S.A. la fertirrigación se lo venido realizando de forma manual y semiautomática. El agua utilizada para el sistema de riego es de pozo profundo que se almacena en una cisterna, y para la fertilización se tiene un tanque de almacenamiento de solución fertilizante preparada, la misma que se dosifica en la línea de agua que se bombea desde la cisterna. Para la dosificación se ha venido utilizando una bomba de inyección hidráulica.

En este sistema no se dispone de instrumentos de medición de campo ni se controlan parámetros. Todas las tareas de fertirrigación se las realizan de manera manual basadas en la experiencia.

Partiendo de este estado de la planta se planteó a los directivos de la empresa la opción de desarrollar un sistema automatizado de fertirrigación y control de pH para un invernadero de plantas madres, el mismo que se implementó durante el año 2010.

El pH del agua de riego es un parámetro importante a ser controlado en la fertirrigación. El valor de pH óptimo de la solución nutritiva para cualquier tipo de

cultivo varía entre 5,5 y 6,5. A estos valores existe una mayor asimilación de nutrientes por las raíces, se consigue una óptima dilución y estabilidad de la solución nutritiva y se evitan obturaciones por precipitados.

El objetivo principal de este trabajo fue implementar una solución de automatización del sistema de fertirrigación y control del pH del agua de riego para plantas de banano en un invernadero de SEBIOCA S.A. a fin de garantizar que el pH del agua de riego que llega a las plantas tenga el valor más óptimo para el tipo de cultivo, que en este caso es 6,5.

El proyecto se lo llevó a cabo en varias etapas. En la primera se realizó mediciones del pH del agua de riego mezclado con fertilizantes que llega a las plantas, que en general es aproximadamente 7,5. Conocido el valor promedio del pH del agua de riego se determinó la concentración de solución de ácido nítrico necesaria para bajar el pH del agua de riego a través de inyectar la solución en la línea mediante una bomba dosificadora eléctrica controlada desde un PLC mediante una señal de control de 4-20mA. El PLC además controla el encendido y apagado de la bomba principal de riego y la bomba dosificadora de la solución ácida.

A continuación se describe resumidamente los contenidos de los capítulos del informe técnico.

Capítulo 1: Metodología o solución tecnológica implementada

Descripción de la fertirrigación y su infraestructura.

Presentación del estado actual de la fertirrigación, descripción de generalidades acerca de la fertirrigación, sus ventajas, y el esquema general de los procesos de fertirrigación.

Especificaciones del equipamiento e infraestructura necesaria para implementar un sistema de control y automatización de la fertirrigación en invernaderos.

Identificación de la planta, diseño y simulación del controlador PI

Capítulo 2: Resultados Obtenidos

Implementación y ajustes del controlador PI mediante un PLC

Supervisión y control del sistema de fertirrigación con un Scada

CAPITULO 1

1. METODOLOGÍA O SOLUCIÓN TECNOLÓGICA IMPLEMENTADA

1.1 Descripción de la fertirrigación y su infraestructura.

En fertirrigación la fertilización y riego van de la mano y de manera más óptima y precisa cuando se aplica la tecnológica. La necesidad de automatizar los procesos de fertirrigación hace surgir nuevos diseños de controladores y la fabricación de equipos, materiales, bombas, automatismos, sensores y otros elementos que permiten la obtención del máximo rendimiento, asegurando la fiabilidad y eficacia del sistema.

A continuación se enumeran las principales ventajas de la fertirrigación, así como los inconvenientes.

1.1.1 Ventajas

- a. Aplicación racional de agua y fertilizantes según la demanda del cultivo.
- b. Mejor desarrollo de los cultivos y respuesta productiva.
- c. Posibilidad de cultivo en suelos de poca calidad (pedregosos, salinos).
- d. Permite el empleo de aguas de baja calidad agronómica en el riego.
- e. Fácil automatización del sistema.
- f. Mejora de la eficiencia del agua y los fertilizantes (distribución uniforme, precisa y controlada del agua y los nutrientes esenciales).
- g. Buena relación beneficio / costo (aumenta la producción y calidad).
- h. Ahorro considerable de agua.

1.1.2 Desventajas

- a. Elevado costo de inversión de las infraestructuras.
- b. Precisa el uso de abonos especiales para fertirrigación (solubles), más caros que los tradicionales.
- c. Necesidad de un mayor nivel técnico del agricultor.
- d. Posibilidad de obturación de los emisores con manejos inadecuados (en el sistema de riego por goteo).
- e. Se necesita presión (energía) para su funcionamiento.

Las grandes ventajas que aporta el sistema de fertirrigación compensan y superan las desventajas citadas que, por una parte, pueden tener una solución relativamente simple. El costo inicial se puede amortizar en poco

tiempo y la obturación de goteros se puede evitar si se sigue una tecnología de fertirrigación adecuada, esto es, controlando adecuadamente el PH. El problema de formación de personal se puede resolver mediante cursos de formación y obras de divulgación escritas para este tema.

1.1.3 Esquema del proceso de fertirrigación

Para conocer la problemática de fertirrigación es necesario describir el proceso completo que se muestra en la Figura 1.1.

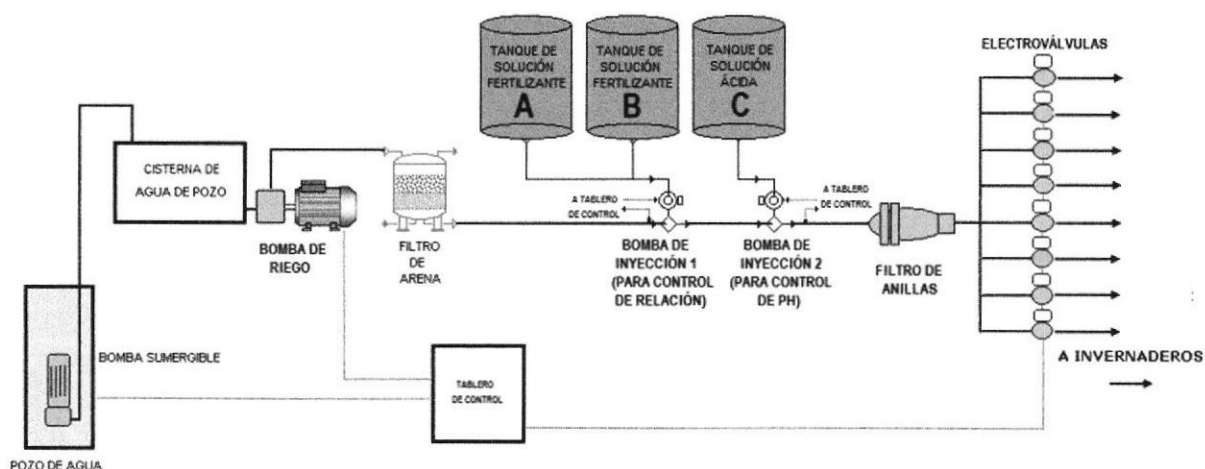


Figura. 1.1. Esquema de un proceso de fertirrigación

En primer lugar, hay que preparar adecuadamente el sustrato del que debe nutrirse la planta para que la aplicación de fertilizantes en el riego tenga la máxima eficacia, incluso también preparar la solución ácida para corregir el pH del agua.

Los tanques que se emplean en Fertirrigación son básicamente, un tanque con Macronutrientes (A), un tanque con Micronutrientes (B) y un tanque con ácido (C).

La disposición de las soluciones fertilizantes puede incluir sistemas de uno, dos o tres tanques, mientras que los micronutrientes se colocan en una tanque adicional y para la corrección del pH se coloca la solución ácida en otro tanque.

En lo que respecta al control, se puede añadir control de relación (con la Bomba de Inyección 1), de pH (con la Bomba de Inyección 2) y conductividad eléctrica, este último para controlar el exceso de sales. Para el control de relación se utiliza un sensor de flujo, el controlador en el tablero de control y la bomba de inyección accionada eléctricamente. Para el control de pH se utiliza un sensor de pH, el controlador en el tablero de control y la bomba de inyección accionada eléctricamente.

El control de relación es para fijar una relación precisa entre el agua de alimentación con la solución que contiene los fertilizantes.

El control de pH es para optimizar la absorción de los nutrientes por parte de las plantas y evitar además las obstrucciones en las canalizaciones. Un pH adecuado permite una buena disponibilidad de nutrientes para las plantas. Por otro lado evita las obstrucciones a la red de riego y a los emisores. En caso que el agua de riego sea muy alcalino y con un pH superior al óptimo se inyecta ácido nítrico o ácido fosfórico para ajustar el pH del agua que irá a las plantas.

El control de la conductividad eléctrica (CE) es para asegurar que el agua que va a la plantas no tenga exceso de sales. Para esto se controla la

inyección de los fertilizantes para ajustarse a una conductividad aceptable. En el caso del presente trabajo no se incluyó.

1.1.4 Cabezal de riego

Un cabezal de riego es el conjunto de dispositivos situado aguas arriba de toda instalación de riego localizado, con las misiones de hacer mediciones, incorporar elementos fertilizantes, filtrar, regular presiones y llevar a cabo los programas de riego establecidos. Los elementos que incorpora un cabezal de riego se muestran en la Figura 1.1 y se describen a continuación.

Los tanques de fertilizantes, tanques (A, B) y de lavado, tanque (C, contiene solución ácida), de los que se extraen, mediante bombas de inyección, las disoluciones concentradas de fertilizantes y la de ácido nítrico diluido para operaciones de lavado, y control del pH. Así se obtiene la disolución fertilizante que después de filtrada llega a la red de goteros o aspersores. Esta disolución reacciona con el sustrato y da lugar a la definitiva disolución nutritiva de la que realmente se alimenta la planta.

Los filtros tratan de prevenir los efectos perjudiciales inherentes al uso de aguas con partículas sólidas en suspensión, orgánicas o minerales, que pueden obstruir los conductos estrechos de un emisor, la sección de las tuberías al sedimentarse y dañar otros dispositivos con elementos móviles. Las precipitaciones a partir de las sustancias disueltas en el agua y de las aportadas por los fertilizantes son, a veces, causantes de una obstrucción lenta y continua de graves consecuencias que debe

eliminarse con tratamientos periódicos. La obstrucción lleva asociada la disminución de caudales y de la eficiencia del riego. Los filtros a instalar son, en general, de tres tipos: hidrociclones, filtros de arena, filtros de malla o anillas.

Las bombas de inyección pueden ser con accionamiento eléctrico o accionamiento hidráulico y su misión es dosificar la solución almacenada en cada tanque en el agua de riego, Figura 1.2.

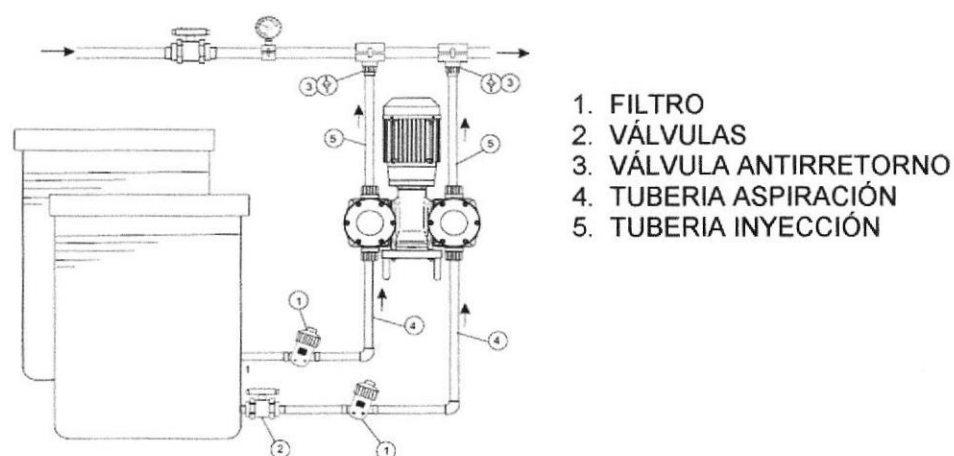


Figura 1.2 Sistema de inyección accionado eléctricamente.

En la Figura 1.1 también se muestra la instrumentación y automatización en un cabezal de riego. De esto depende, en gran parte, el éxito o fracaso del riego, por lo que debe prestarse una gran importancia a su instalación, ya que desde él se regula el suministro de agua y un gran número de prácticas agrícolas, tales como la fertilización y la aplicación de pesticidas. Los sensores más empleados en fertirrigación son el de flujo, de pH y de conductividad eléctrica con sus respectivos transmisores. Las señales de los transmisores, 4-20mA, son leídas por el controlador que a la vez envía las señales de control a los actuadores de acuerdo al algoritmo programado.

En los sistemas de riego localizado lo usual es contar con un sistema de bombeo que dota al agua de la presión necesaria para alcanzar el punto más lejano de la red, y puede formar parte del cabezal o estar en un lugar independiente.

Las electroválvulas son necesarias para la automatización de limpieza de filtros, comienzo y final del ciclo de inyección de productos químicos, cambio de sector de riego, etc.

Por último, el sistema de control instalado en el tablero establece un programa de tiempo, control de relación de dilución con el agua de riego, control de pH, control de electroválvulas, control de bomba de pozo y de riego.

1.2 Identificación, modelo y control del sistema de fertirrigación

1.2.1 Esquema de la Planta a controlar

La planta está representada en la Figura 1.3. La bomba de riego abastece de agua mezclada con fertilizantes desde un depósito Figura 1.4.

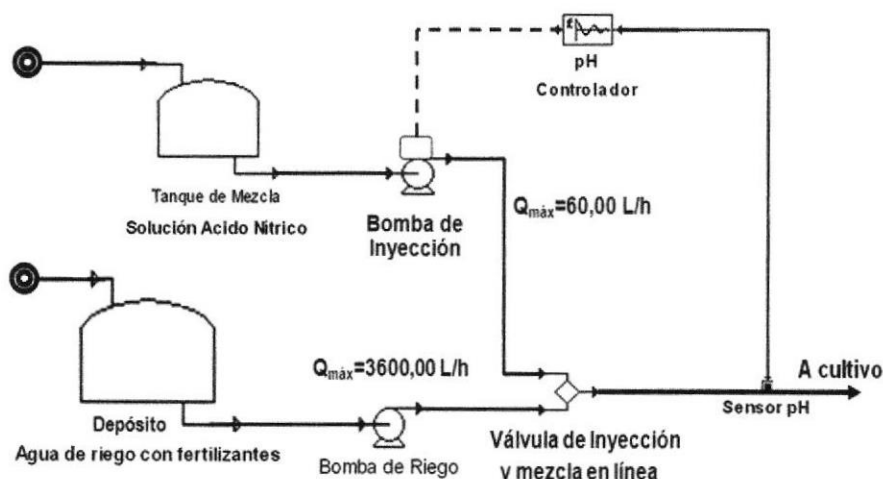


Figura. 1.3. Esquema de la planta a controlar



Figura. 1.4. Bomba de riego.

En la tubería de agua de riego se encuentra instalado un sensor de pH, que mide el pH del agua de riego que va al invernadero, Figura 1.5. También hay una bomba de inyección que dosifica ácido nítrico en el agua de riego a fin de bajar el valor del pH, Figura 1.6.

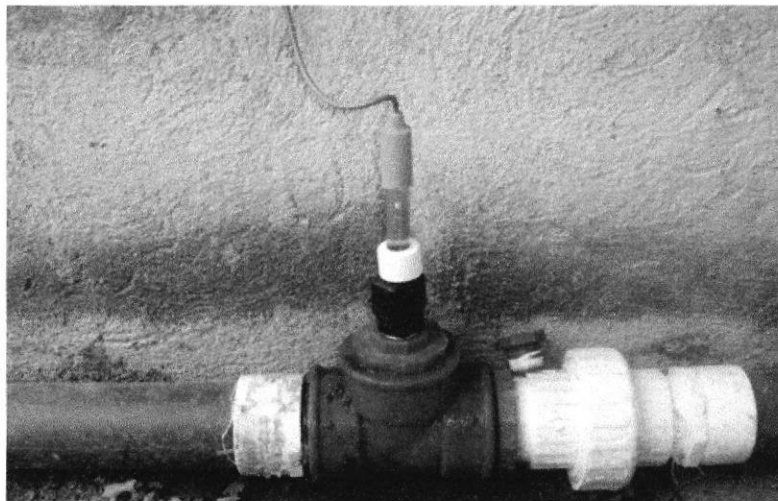


Figura. 1.5. Sensor de pH.

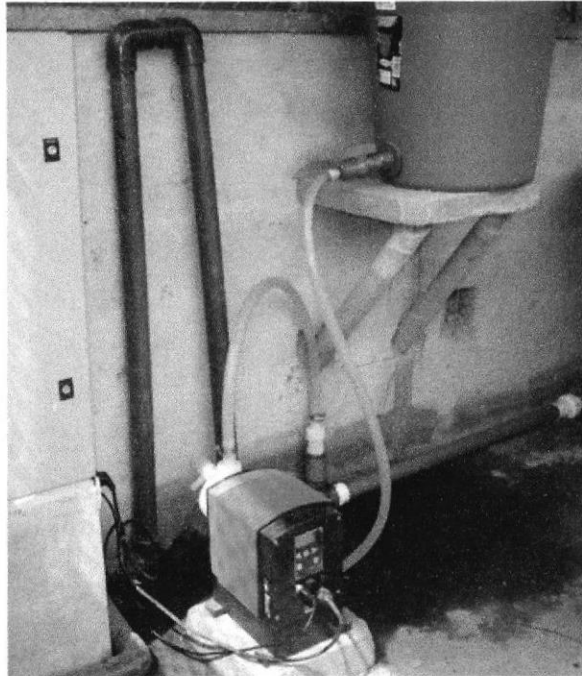


Figura. 1.6. Bomba de inyección y tanque de ácido nítrico.

El proceso que se tiene que controlar consiste en un sistema en lazo cerrado del tipo SISO de la variable pH. El sensor de pH mide el valor del pH del agua que va al invernadero, Figura 1.7. La señal que envía el transmisor de pH es de 4-20 mA correspondiendo a un rango de pH 0-14.



Figura. 1.7. Transmisor de pH.

Esta señal es leída por el PLC el cual tiene configurado en su programa el controlador de lazo cerrado PI. El PLC, Figura 1.8, gobierna el encendido y

regulación de la bomba de inyección. Esta bomba es controlada con una señal de 4-20 mA correspondiente a un flujo entre 0-60 LPH. La bomba de inyección dosifica ácido nítrico al agua de riego para controlar el pH óptimo que es 6,5. La aplicación del agua de riego al cultivo es a través de cañerías directamente a la raíz de las plantas, Figura 1.9.

El PLC también controla el encendido de la bomba de riego principal y el tiempo de operación, incluido la opción manual-automático.

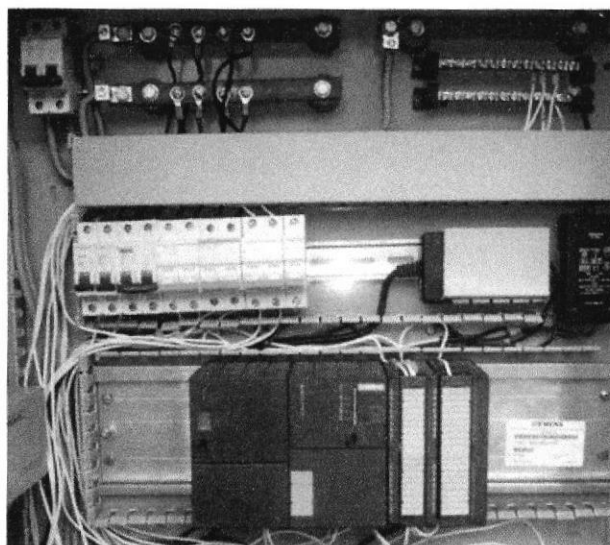


Figura. 1.8. Tablero de control con PLC.



Figura. 1.9. Cañerías por donde se aplica la fertirrigación con control de pH a las plantas de banano.

1.2.2 Justificación del control del pH del agua de riego.

El pH es un parámetro que indica la acidez o basicidad de una solución. Se considera el pH 7 como neutro. El valor de pH óptimo de la solución nutritiva para cualquier tipo de cultivo varía entre 5,5 y 6,5. A estos valores existe una mayor asimilación de nutrientes por las raíces, se consigue una óptima dilución y estabilidad de la solución nutritiva y se evitan obturaciones por precipitados.

Valores demasiado altos de pH ($>7,5$) disminuyen la disponibilidad del fósforo, hierro y zinc para las plantas, además se pueden formar precipitados de carbonatos y fosfatos de calcio y magnesio en las tuberías y emisores. Valores demasiado bajos de pH ($<5,5$) pueden aumentar las concentraciones de aluminio y manganeso hasta niveles tóxicos. Normalmente el agua de riego tiene un pH superior a 6,5. Este pH se puede bajar incorporando algún ácido.

Los ácidos más utilizados en soluciones nutritivas son el ácido nítrico y el ácido fosfórico. Una cantidad de 0,5 litros/1000 litros de agua suele ser suficiente para mantener un pH ligeramente ácido. En caso de que el agua tenga un pH mayor de 7,5 se incrementaría la dosis hasta 1-2 litros/1000 litros de agua.

En nuestro caso, para conseguir el objetivo de reducir el pH hasta 6,5, se diluyó 240 ml de ácido nítrico concentrado en un tanque de 60L de agua. Esta solución se inyectó a la red de agua de riego que tiene un caudal de $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. A continuación se muestra algunas curvas empíricas que nos

ayudarán a determinar el flujo de la solución ácida y su concentración para bajar el pH en 2 puntos.

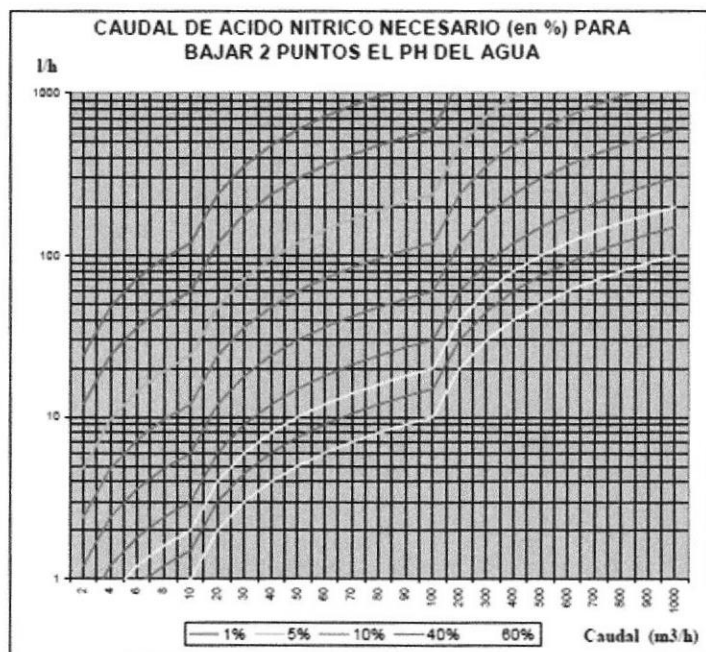


Figura. 1.10. Curvas aproximadas para reducir el pH del agua de riego usando ácido nítrico

1.2.3 Identificación del modelo de la planta.

Para controlar la planta se debió determinar su modelo mediante la identificación. La planta se experimentó en lazo abierto para obtener valores de la identificación del sistema. Se encendió la bomba de riego manteniendo el caudal normal de operación. La bomba de inyección funcionó de manera periódica durante 120s encendida y 120s apagada. Cuando estaba encendida se fijó el caudal en 40 LPH. De esta manera, la bomba de inyección operó formando una onda periódica de caudal, Figura 1.12.

Con una aplicación de LabView, Figura 1.11, se leyó unas 2700 parejas de muestras, tomando las dos muestras cada segundo. Los datos que se leyeron fueron de dos tipos. Un tipo de dato que se tomó fue el caudal de la bomba de inyección que permaneció en 0 LPH durante 120 s y en 40 LPH durante 120 s, simultáneamente se tomaron, cada segundo, una muestra de pH del agua que iba al cultivo. La señal que se leyó del transmisor de pH fue en el rango de 4-20mA, que a su vez corresponde al rango de pH 0-14. Para lograr escalar el rango de corriente al rango de pH se elaboró un programa en LabView.

El siguiente gráfico indica la aplicación en LabView utilizada para leer la señal del transmisor, escalarla al rango de pH y generar un archivo en Excel de los datos adquiridos.

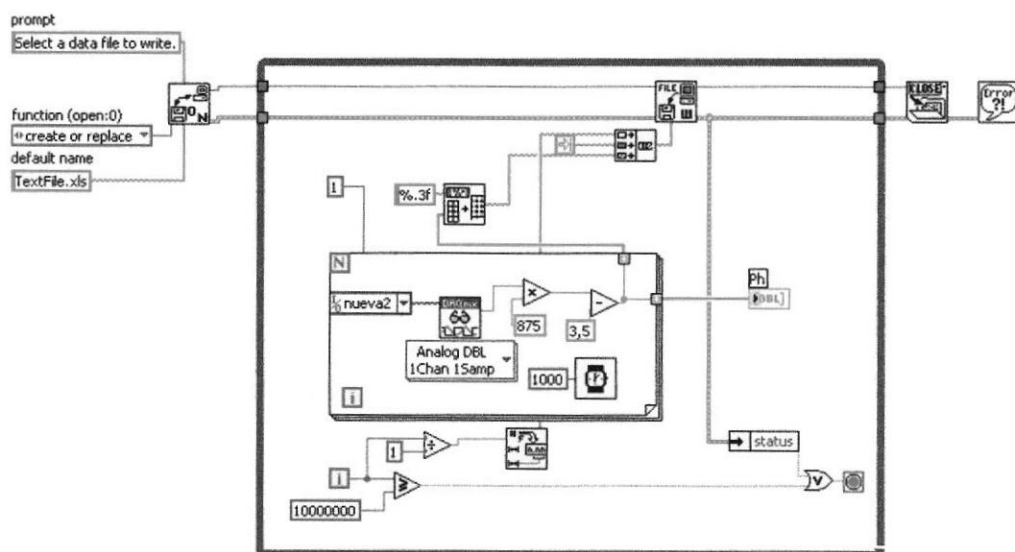


Figura. 1.11 Aplicación en LabView para la lectura y escalado de pH.

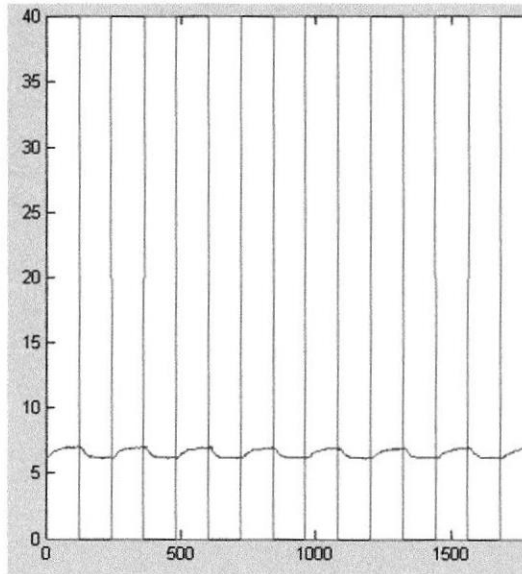


Figura. 1.12. Onda cuadrada de caudal de color azul de 0 y 40 LPH y respuesta de pH, línea verde

Desde LabView se generó una tabla en EXCEL llamada ph.xls. Para obtener el modelo de la planta se utilizó el System Identification Toolbox de MATLAB. La tabla generada se leyó desde MATLAB con el scrip:

```
tabla='ph.xls';
a=xlsread(tabla);
```

La matriz **a** contiene los datos leídos de Caudal y pH.

En Command Window se abre la herramienta ident:

```
>> ident
```

Opening System Identification Tool done.

```
>> ident
```

A continuación se indican todos los pasos realizados para usar esta herramienta y así obtener el modelo de la planta.

Lo primero que se hizo fue importar los datos adquiridos en términos del tiempo que se encuentran guardados en la matriz **a**, Figura 1.13

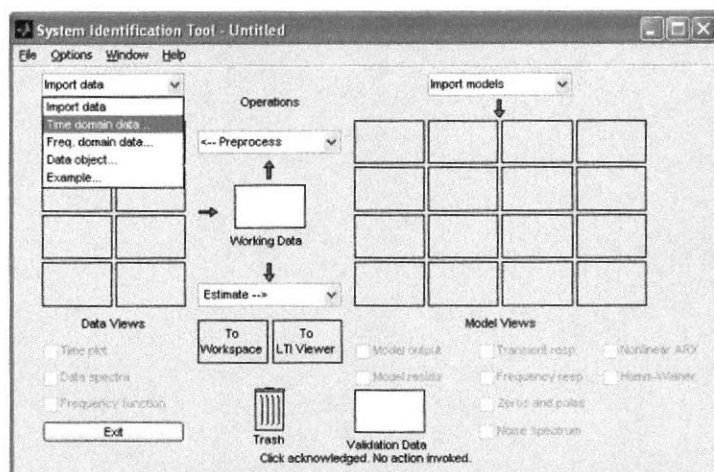


Figura. 1.13. Ventana que permite Importar datos.

Los dos tipos de datos medidos en el dominio del tiempo, Caudal y pH, ahora están en la matriz **a**. El Caudal en LPH está en la columna 1 de **a** y el pH en la columna 2. La columna 1 corresponde a la variable de entrada de la planta (input) y la columna 2 corresponde a la variable de salida de la planta (Output). Los datos de las variables de entrada y salida de la matriz **a** son importados a través del formato de la Figura 1.14.

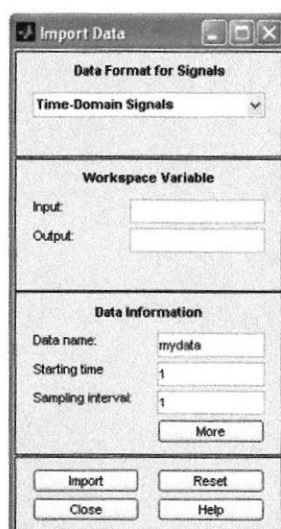


Figura. 1.14. Formato de importación de datos de las señales de entrada y salida de la planta.

El formato de importación de datos aparece mediante la opción *Import data-Time domain data*. Luego se llenan los espacios del formato según indica la Figura 1.15. Aquí, el botón *More* permite incluir información adicional como los nombres de las variables y unidades. Luego de esto se presiona el botón *Import*.

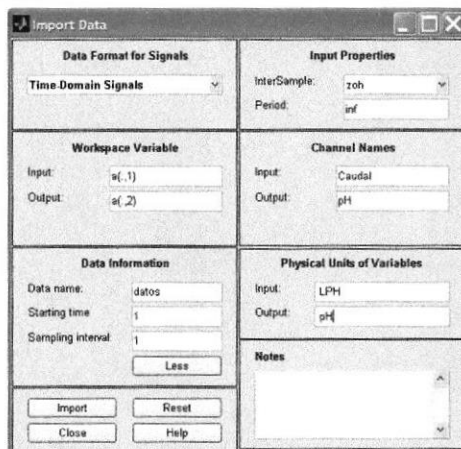


Figura. 1.15. Llenado de formato de importación de datos de las señales de entrada y salida de la planta.

Los datos importados aparecen inicialmente en Data Views, en Working Data (Datos de trabajo) y en Validation Data (Datos de validación) Figura 1.16, por el momento el conjunto de datos son los mismos para trabajar y para validación. Esto no se debe dar, sino que los datos de trabajo deben ser diferentes a los de validación.

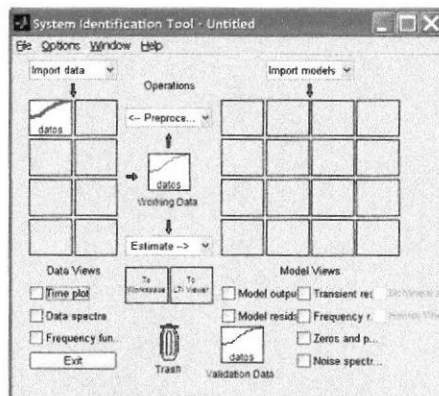


Figura. 1.16. Visualización inicial de los datos importados.

Marcando Time plot podemos visualizar las gráficas de entrada y salida que se encuentran seleccionadas en Data views, Figura 1.17.

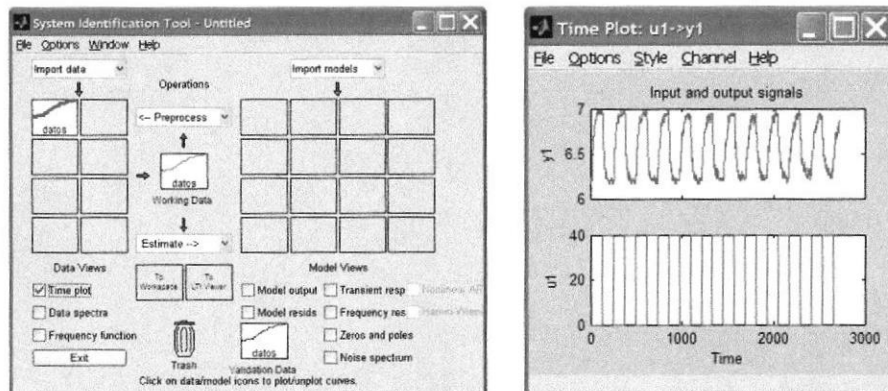


Figura. 1.17. Visualización gráfica de entrada y salida

Aquí se muestra la característica de las señales experimentales empleadas para la identificación. Podemos cerrar *Time plot* para seguir con los siguientes pasos previos a la identificación del modelo.

Un paso siguiente consiste en determinar un conjunto de datos de entrada y salida que se utilizarán como datos de trabajo y otro conjunto de datos así mismo de entrada y salida que servirán como datos de validación. No se puede utilizar los mismos conjuntos de datos para trabajo y validación. El primer grupo de datos, el de trabajo, lo seleccionamos con la opción *Select range* en *Preprocess*, Figura 1.18.

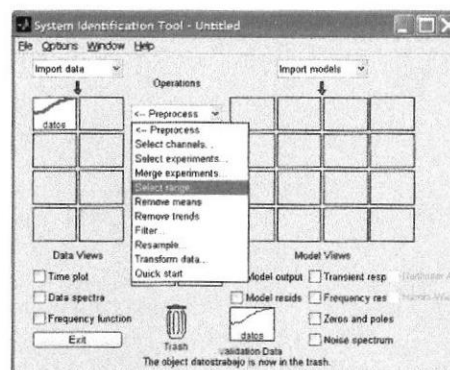


Figura. 1.18. Selección de un grupo de datos de trabajo o de validación.

El primero grupo de datos seleccionado es el de trabajo. El rango se selecciona escribiendo tiempo inicial, tiempo final, nombre en Data name y luego se presiona insert, Figura 1.19.

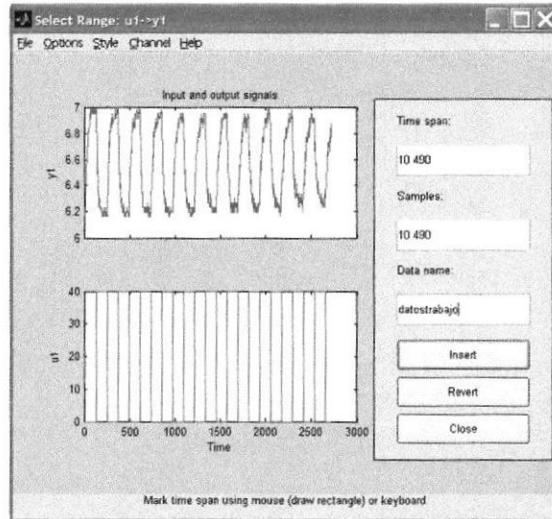


Figura. 1.19. Grupo de datos de trabajo.

El segundo grupo de datos seleccionado es el de validación. El rango se selecciona escribiendo diferentes valores de tiempo inicial, tiempo final, nombre en Data name y luego se presiona insert, Figura 1.20.

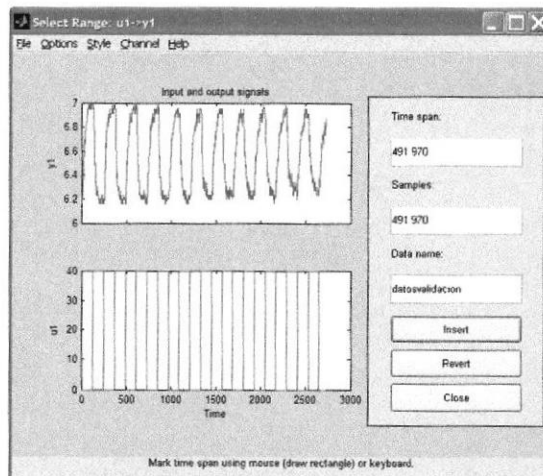


Figura. 1.20. Grupo de datos de validación.

Para la identificación se escogen entre varios modelos que mejor puedan representar al modelo de la planta. Entre los cuales, por ejemplo se escogió los modelos lineales ARX y ARMAX. En cada caso se seleccionó Estimate, Figura. 1.21.

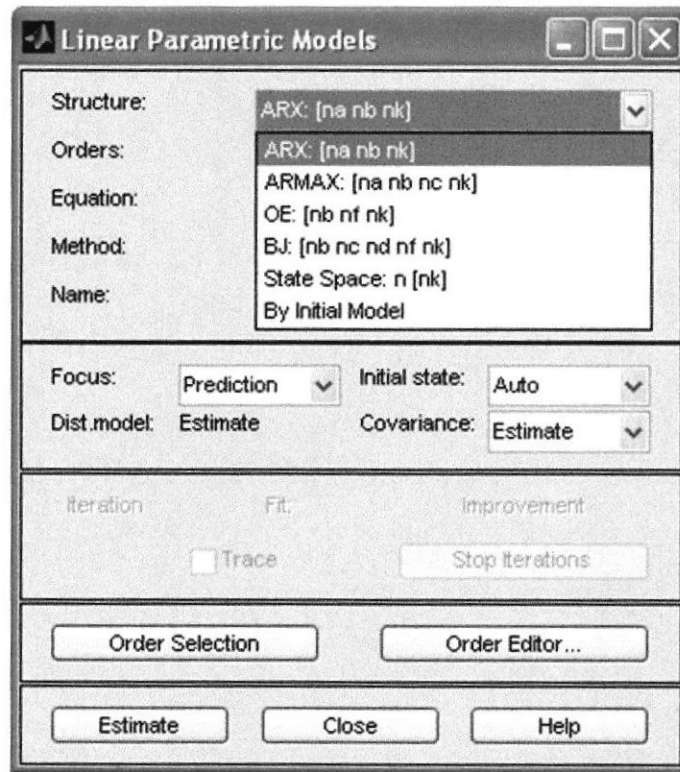


Figura. 1.21. Modelo Lineal ARX y ARMAX.

Después de esto se crean los modelos en Model View, Figura 1.22.

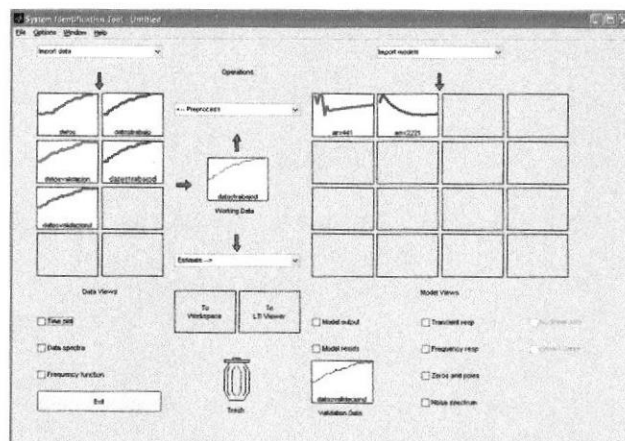


Figura. 1.22. Modelos estimados en Model View.

Ahora se escogen otros modelos estimados importantes en Process Models, Figura 1.23.

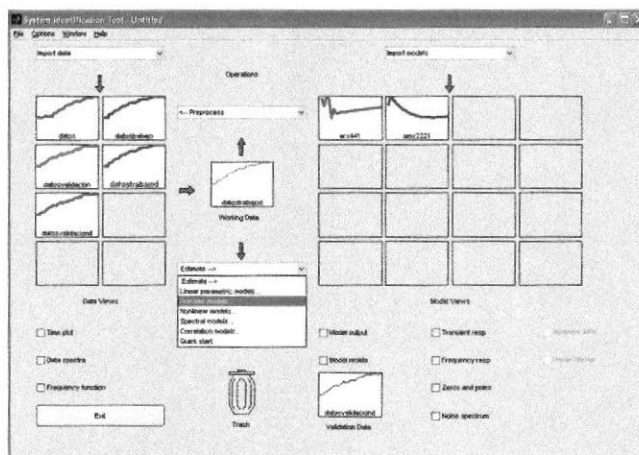


Figura. 1.23. Modelos de Procesos.

Después de estos pasos tenemos ya cuatro modelos de procesos estimados. Estos se visualizan en Models View, Figura. 1.24.

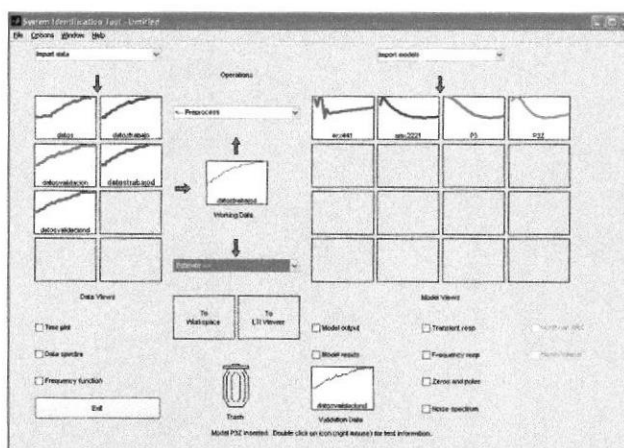


Figura. 1.24. Modelos estimados.

Ahora se verificó el modelo más conveniente que mejor representa la planta. Para esto, visualizamos la comparación de los valores de los modelos estimados y las mediciones de la salida del proceso, Model output, Figura. 1.25, Figura. 1.26.

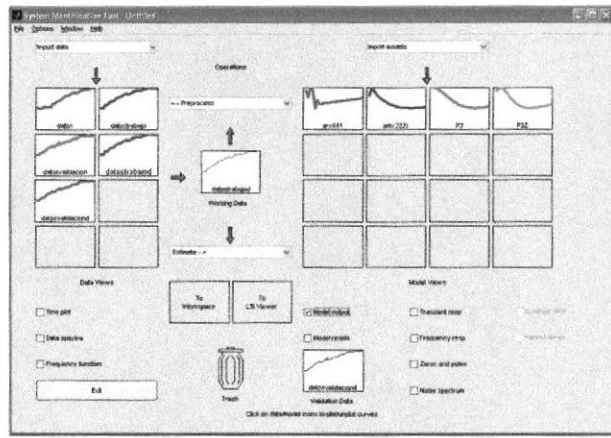


Figura. 1.25. Visualizar modelos estimados y mediciones de salida.

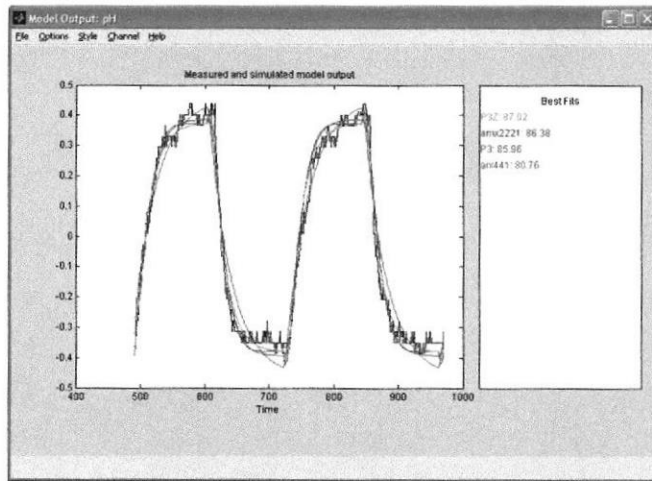
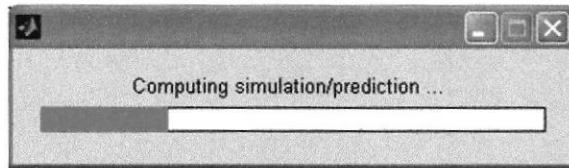


Figura. 1.26. Visualización de comparación de cuatro modelos estimados con mediciones de salida del proceso.

Al observar los estimadores se escogió un modelo que mejor represente a los valores de salida de la planta. En base a este criterio transferimos el modelo P3 a Workspace, Figura. 1.27.

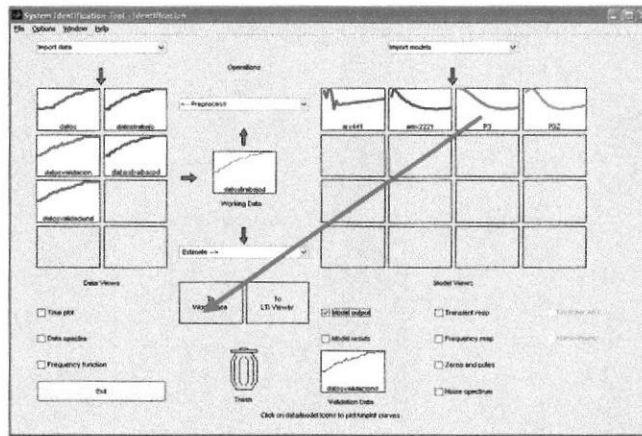


Figura. 1.27. El modelo seleccionado se transfiere a Workspace.

Para obtener el modelo del proceso transferido a Workspace, en Command Window se escribió:

```
>> P3
```

Process model with transfer function

$$G(s) = \frac{K}{(1+Tp1*s)(1+Tp2*s)(1+Tp3*s)}$$

with K = -0.019476

$$Tp1 = 14.022$$

$$Tp2 = 7.0169$$

$$Tp3 = 6.9984$$

```
>> a=[K]
```

```
a =
```

```
-0.019476
```

```
>> b=conv(conv([Tp1 1],[Tp2 1]),[Tp3 1])
```

```
b =
```

```
Columns 1 through 3
```

```
688.57937704512    245.62960956    28.0373
```

```
Column 4
```

```
1
```

```
>> num=deconv(a,[688.57937704512])
```

```
num =
```

```
-2.82843208049256e-005
```

```
>> den=deconv(b,[688.57937704512])
```

```
den =
```

```
Columns 1 through 3
```

```
1    0.356719381597025    0.0407176005187893
```

```
Column 4
```

```
0.00145226539355749
```

```
>> G=tf(num,den)
```

```
Transfer function:
```

```
-2.828e-005
```

```
-----  
s^3 + 0.3567 s^2 + 0.04072 s + 0.001452
```

La expresión anterior, por tanto, representa el modelo de la planta.

$$G(s) = \frac{-2.828 * 10^{-5}}{s^3 + 0.3567s^2 + 0.04072s + 0.001452} \quad [1.1]$$

Modelo de la planta

Otra forma de obtener la función de transferencia es con el comando:

```
>> G=tf(P3)
```

Transfer function from input "Caudal" to output "pH":

-2.828e-005

s^3 + 0.3567 s^2 + 0.04072 s + 0.001452

1.2.4 Diseño de un controlador clásico PI.

El ajuste y la implementación de algoritmos de control PID implican diversas tareas, entre las que se incluyen:

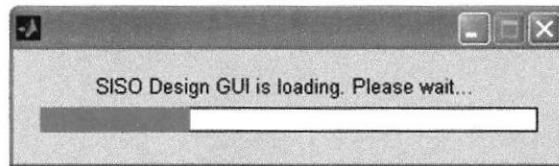
- Selección de un algoritmo de control PID apropiado (P, PI o PID).
- Ajuste de ganancia del controlador.
- Simulación del control PID con respecto a un modelo de planta.
- Implementación del controlador en un procesador de ejecución.

El controlador que se implementó para esta planta es el Controlador PI, ya que es el más recomendable para plantas que presentan ruido.

Para el diseño del controlador PI se usó SISOTOOL de Matlab.

En Command Window se ejecutó la herramienta, SISOTOOL aplicada a la función de transferencia G, la cual representa el modelo de la planta.

```
>> sisotool (G)
```



Al ejecutar "sisotool" en la línea de comandos de MATLAB se abre la ventana que se llama "Control and Estimation Tool Manager". A continuación se muestra la imagen de la ventana, Figura 1.28.

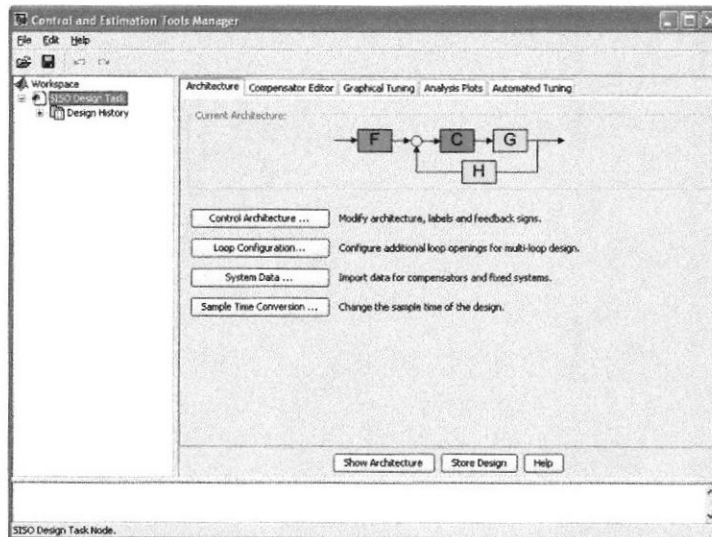


Figura. 1.28 Control and Estimation Tool Manager del Sistema.

En "Control and Estimation Tool Manager" se escoge la arquitectura de control a utilizar. En la pestaña "Architecture", al dar clic en el botón "Control Achitecture" se despliega una ventana que muestra una lista de

las arquitecturas disponibles. Para este caso se seleccionó el que se muestra en la Figura 1.28.

Después de seleccionar la arquitectura, se importa la función de transferencia de $G(s)$ desde la ventana "SISO Desing for SISO Desing Task", con la opción "importar" del menú "File". AL dar clic en "importar" Se despliega una ventana en donde se muestra una lista de los sistemas de la arquitectura seleccionada, en este caso G, H, C y F que por defecto tienen el valor de "1". La imagen de esta ventana se muestra en la Figura 1.29.

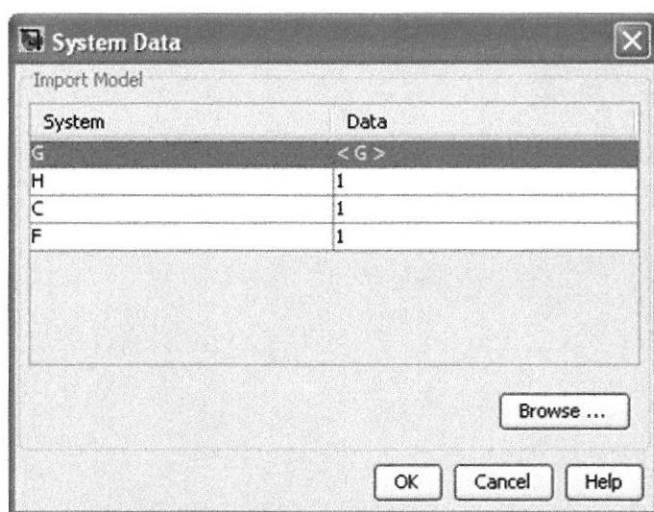


Figura. 1.29. Importar modelo de la planta.

Se selecciona "G" que corresponde a la planta y se presiona "Browser". Entonces aparece otra ventana que muestra una lista de las funciones de transferencia que se encuentran en el WorkSpace y en donde debe estar la función "G" definida anteriormente y que corresponde a nuestra planta. Ahora se selecciona nuestra planta es decir "G" se presiona "import", se cierra esta ventana y por último se presiona "OK" en la ventana anterior.

Para iniciar el ajuste del controlador PI, en la ventana Automated Tuning se escoge el algoritmo de control PI y se presiona Update Compensator, Figura 1.30.

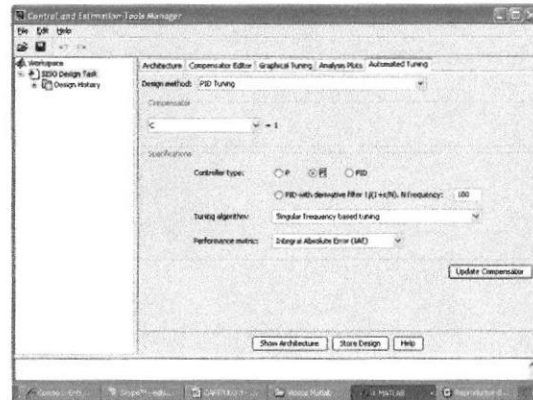
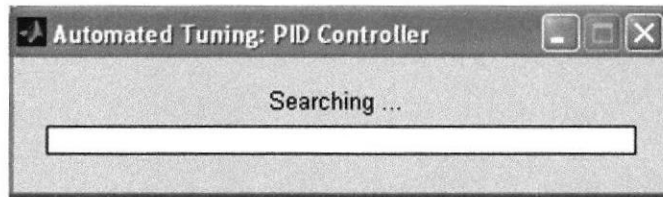


Figura. 1.30. Selección de autotuning, PI y Update Compensator



Una vez que se ejecuta el autoajuste, aparece la función de transferencia del controlador o compensador PI, Figura 1.31.

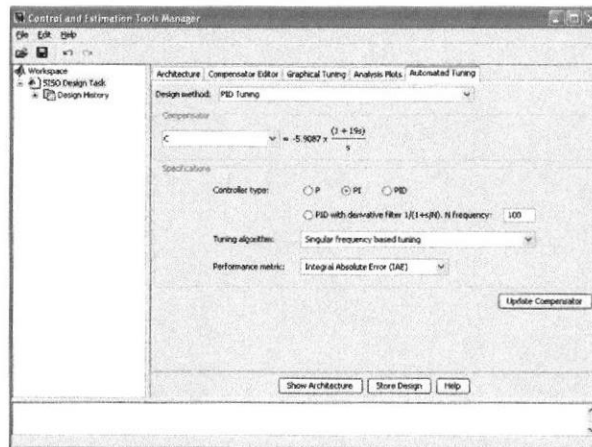


Figura. 1.31. Función de transferencia del controlador PI

Ahora se agrega los requerimientos del diseño. Para esto se agregó dos requerimientos de diseño, el tiempo de asentamiento o "Settling time" y el porcentaje de sobrepaso o "Percent Overshoot". Para agregar un nuevo requerimiento de diseño se da un clic derecho sobre la gráfica y se

selecciona "Design Requirements" y luego "New". Así como se muestra en la Figura 1.32.

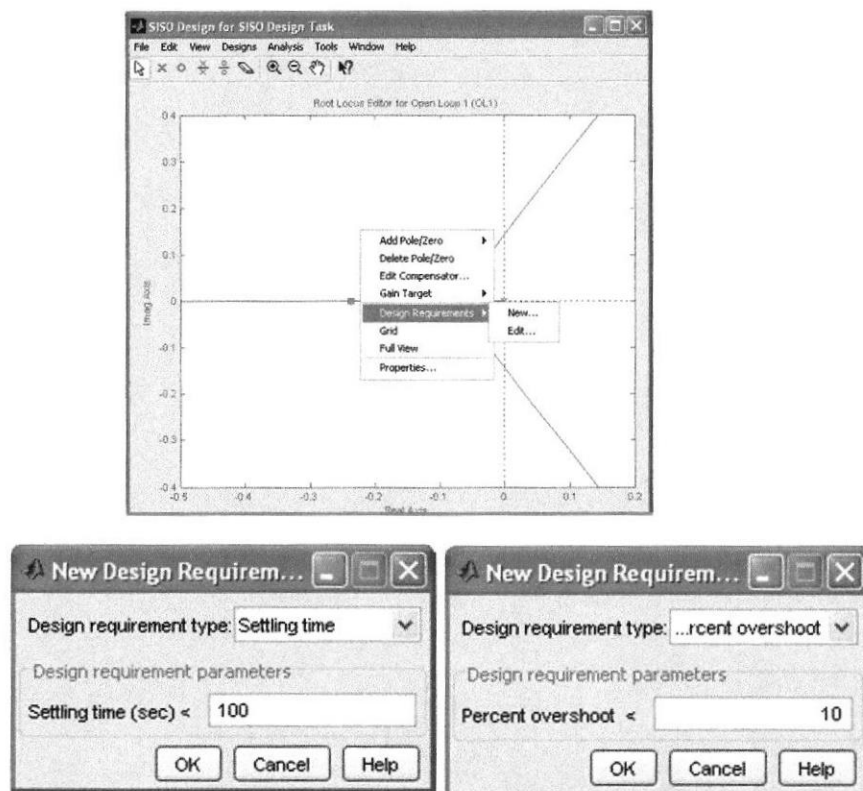


Figura. 1.32. Ajuste adicional mediante especificaciones de Peak Response del 10% y Settling Time de 100s.

Con el ajuste se obtiene la nueva gráfica de la Figura 1.33.

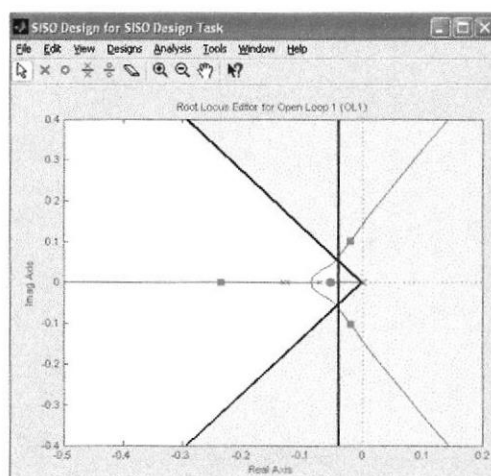


Figura. 1.33. Resultado del ajuste Peak Response del 10% y Settling Time de 100s.

Con un nuevo ajuste manual del cero y la ganancia del controlador se obtiene un resultado más aproximado al requerido, Figura 1.34 y Figura 1.35.

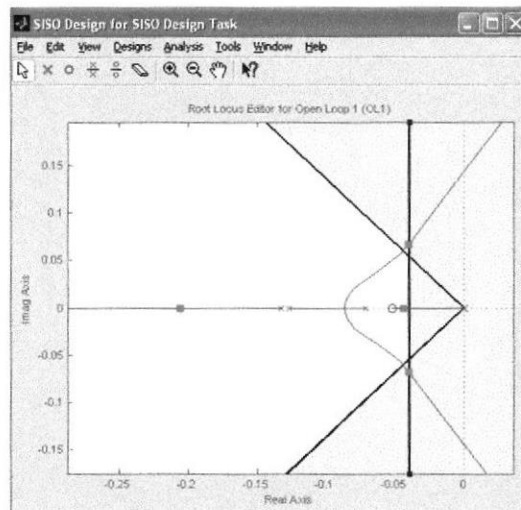


Figura. 1.34. Movimiento manual del cero y la ganancia del controlador.

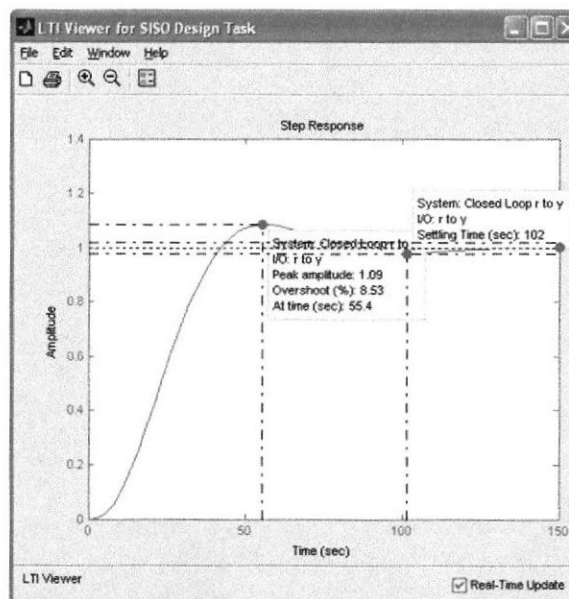


Figura. 1.35 Respuesta al escalón luego del ajuste.

En la Figura 1.36 se muestra la función de transferencia del controlador obtenida.

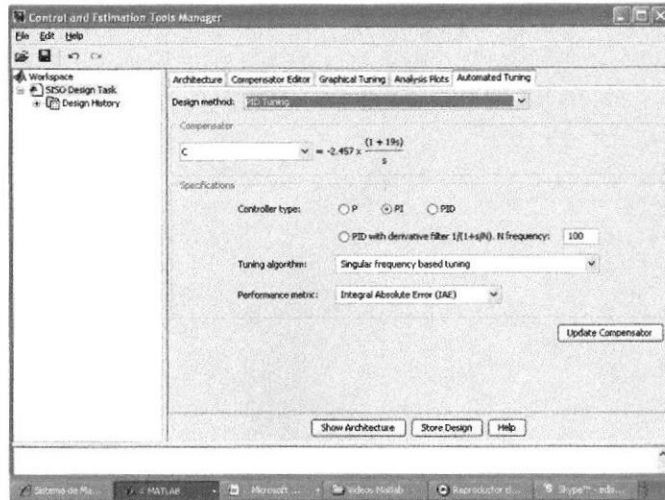


Figura. 1.36. Controlador PI con ajustes finales.

Una vez obtenido el modelo del compensador especificado se lo exportó Workspace, Figura 1.37.

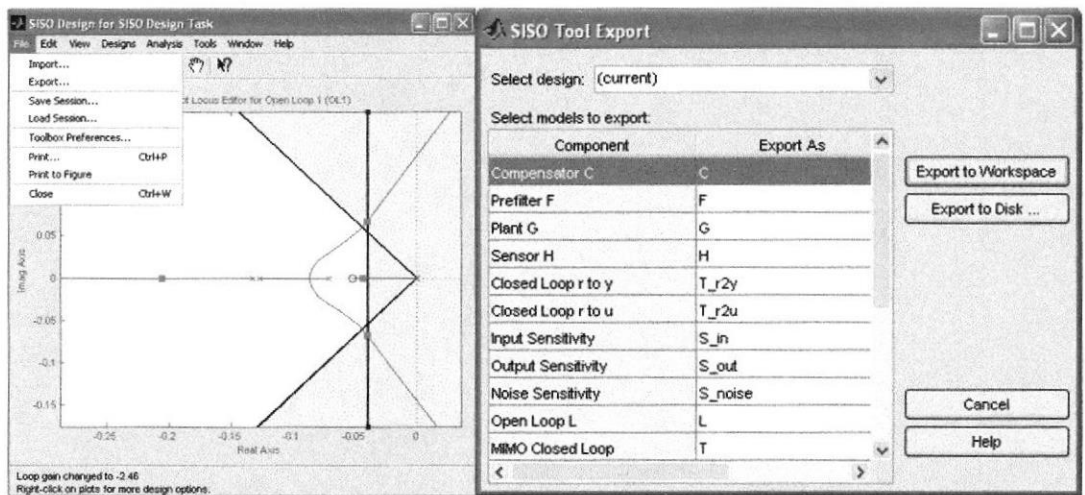


Figura. 1.37. Exportación del Controlador PI a Workspace.

Una vez exportada a Workspace lo abrimos desde Command Window.

>> C

Zero/pole/gain from input "Input" to output "Output":

-47.3137 (s+0.05193)

Entonces el Controlador tiene la siguiente función de transferencia:

$$C_{(s)} = \frac{-47.3137(s + 0.05193)}{s} \quad [1.2]$$

De este formato, convertimos al formato del Controlador PI en Matlab:

$$C_{(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} = -47.3137 - \frac{2.457000441}{s} \quad [1.3]$$

Finalmente, se convierte al formato estándar del Controlador PI:

$$C_{(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) = -47.3137 \left(1 + \frac{0.05193}{s} \right)$$

$$C_{(s)} = -47.3137 \left(1 + \frac{1}{19.2566917s} \right) \quad [1.4]$$

1.2.5 Simulación del control PI con respecto al modelo de planta.

A continuación se presenta la simulación del control aplicado a la planta. Su arquitectura se muestra en la Figura 1.38. El formato del controlador PI que se muestra en la ecuación [1.3] y la planta se simuló en lazo cerrado con la herramienta Simulink de Matlab.

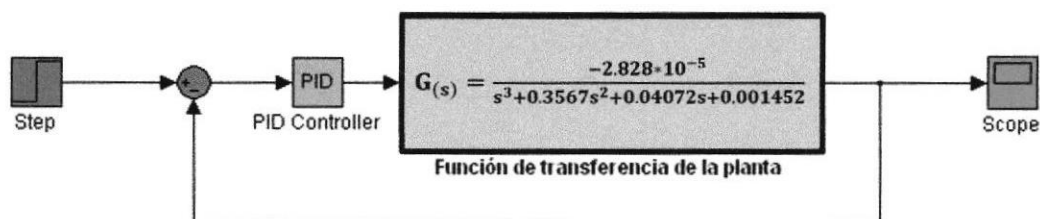


Figura. 1.38. Arquitectura del control.

Para la simulación se ingresó los parámetros del bloque PI conforme la Figura 1.39. La respuesta en lazo cerrado del control, a un impulso escalón se muestra en la Figura 1.40

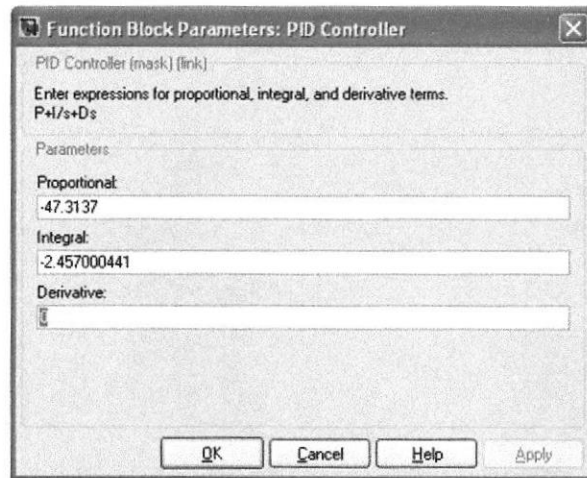


Figura. 1.39. Parámetros del Controlador PI.

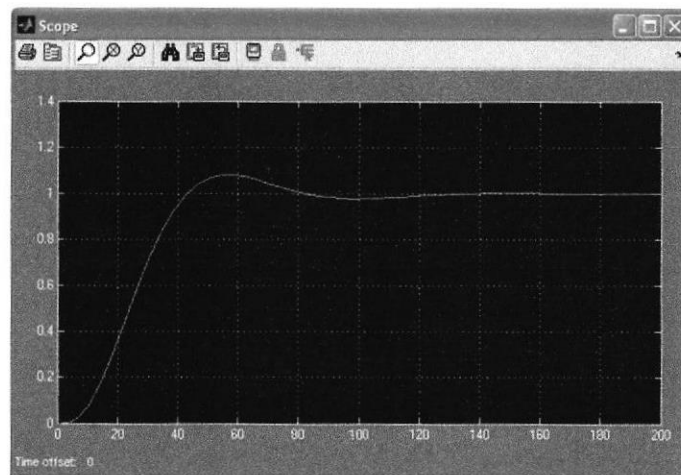


Figura. 1.40. Respuesta en lazo cerrado a impulso escalón.

CAPITULO 2

2. RESULTADOS OBTENIDOS

2.1 Control de bombeo, control continuo de pH de agua de riego, implementación del algoritmo de control del lazo PI, elaboración de programas para control y monitoreo.

Una vez que se obtuvo el modelo del controlador, este se lo implementó en el PLC SIEMENS S7-300.

El controlador obtenido es del tipo paralelo, similar al controlador del PLC.

A continuación se muestra la estructura del controlador del PLC, Figura 2.1.

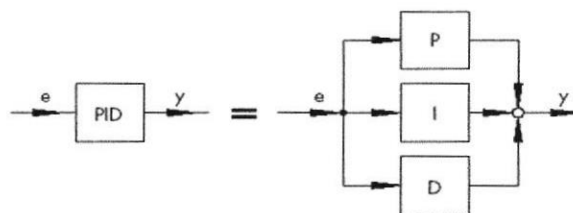


Figura. 2.1. Estructura del controlador del PLC.

Su ecuación descriptiva se muestra en la ecuación [2.1]

$$y(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{\tau_I} \int e(t) dt + K_p \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad [2.1]$$

La función de transferencia del controlador PID Ideal en el PLC se representa en la ecuación [2.2]

$$C(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad [2.2]$$

Reemplazando los parámetros del controlador PI del PLC nos queda,

$$C(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) = -47.3137 \left(1 + \frac{1}{19.2566917s} \right) \quad [2.3]$$

$$K_p = -47.3137; \tau_I = 19.2566917 \text{ seg.}$$

Estos parámetros se ingresaron al bloque de datos del PLC para el controlador PI, Figura 2.2.

Declaración	Nombre	Tipo	Valor inicial	Valor actual	Comentario	
10	in	SP_INT	REAL	0.000000e+000	6.451613e+001	internal setpoint
11	in	PV_INT	REAL	0.000000e+000	0.000000e+000	process variable in
12	in	PV_PER	WORD	W#16#0	W#16#4580	process variable peripherie
13	in	MAN	REAL	0.000000e+000	2.000000e+001	manual value
14	in	GAIN	REAL	2.000000e+000	-4.700000e+001	proportional gain
15	in	TI	TIME	T#20S	T#19S257MS	reset time
16	in	TD	TIME	T#10S	T#10S	derivative time

Figura. 2.2. Parámetros del Controlador PI (DB41).

A fin de ajustar el controlador, se realizó la parametrización del controlador con la planta en operación, Figura 2.3.

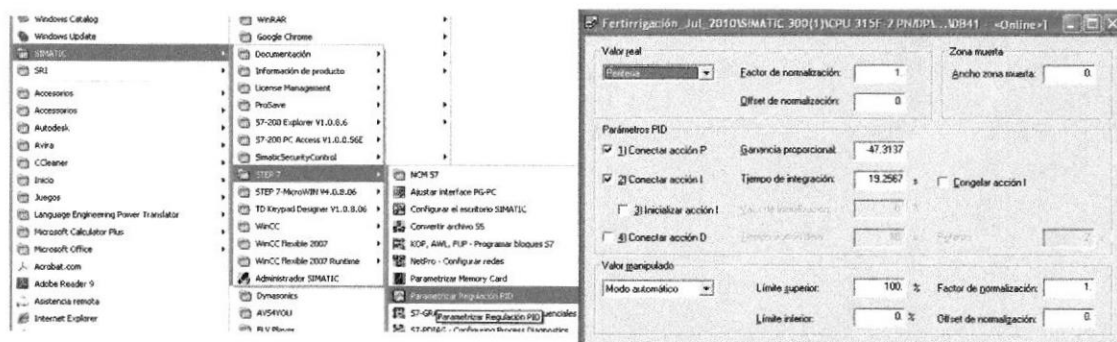


Figura. 2.3. Parametrización del Controlador PI en operación (DB41).

Se puede visualizar también los valores de operación en el bloque PI del PLC en modo ONLINE, Figura 2.4.

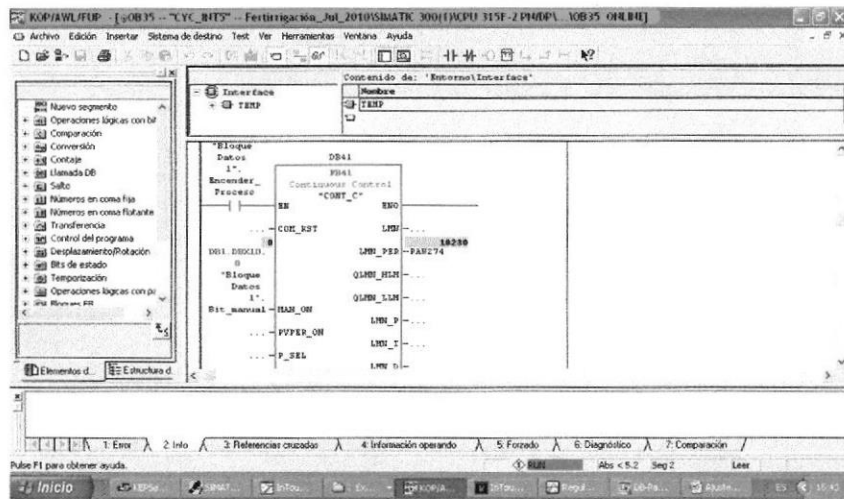


Figura. 2.4. Valores de operación del controlador PI.

Para la supervisión de la planta se elaboró una aplicación de Scada desde donde también se dan las órdenes al control, Figura 2.5.

La PC con el Scada y el PLC están comunicados vía Ethernet.

En el PLC hay funciones que ejecutan el control de las bombas como también el control continuo del pH mediante la operación de la bomba de inyección, que recibe una señal de 4-20mA desde el PLC.

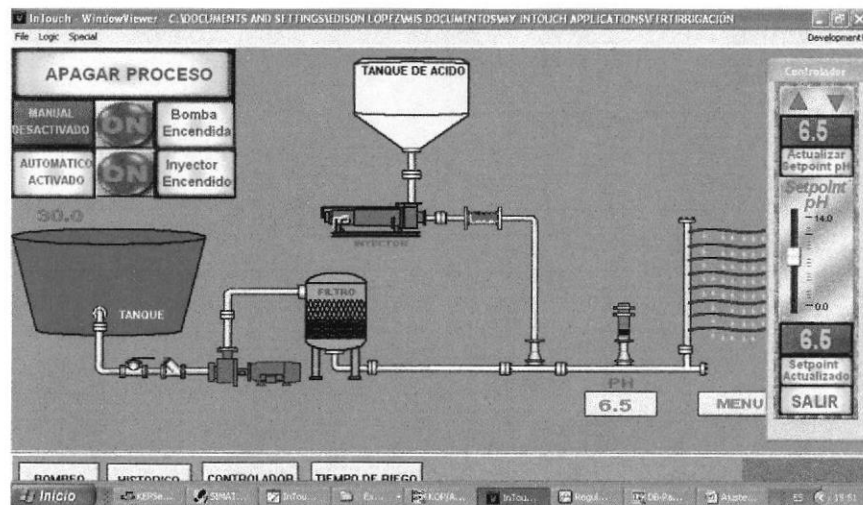


Figura. 2.5. Pantalla principal en SCADA, slider de ajuste de setpoint.

Hay funciones que ejecutan el control en modo manual o automático. En modo manual se pueden encender las bombas individualmente y se puede ajustar manualmente el flujo de la bomba dosificadora, en modo automático el control enciende las bombas automáticamente con las condiciones necesarias y ajusta el pH al valor deseado.

El bloque PID del PLC configurado para trabajar como controlador PI tiene la opción de trabajar en modo manual o automático. En modo automático, la bomba dosificadora ajusta el caudal para mantener el pH del agua de riego en el valor fijado como Setpoint.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se automatizó el sistema de fertirrigación y se controló el pH del agua de riego en un invernadero de plantas de banano de la Empresa SEBIOCA S.A. mediante el uso de herramientas de simulación (Matlab), tarjeta y software de adquisición de datos (LabView), instrumentos de campo, controlador lógico programable (PLC), sistema de supervisión (SCADA) y actuadores accionados eléctricamente como son la bomba de riego y la bomba de inyección. El pH del agua de riego se controló desde un valor aproximado de 7,2 hasta 6,5, valor recomendado para cultivo de banano, lo cual mejora la asimilación de nutrientes por las raíces, se consigue una óptima dilución y estabilidad de la solución nutritiva y se evitan obturaciones por precipitados.
2. Las ventajas de la implementación del sistema de fertirrigación superan sus desventajas. Por ejemplo, la elevada inversión inicial se recupera con el incremento de calidad y productividad.
3. Durante la implementación del presente proyecto se realizaron las mediciones necesarias para conocer el comportamiento del pH del agua de riego. Frente a un escalón de caudal de la solución de ácido nítrico, la respuesta del pH del agua de riego es una curva lenta que puede ser representada por un sistema lineal de tercer orden.

$$G(s) = \frac{-2.828 * 10^{-5}}{s^3 + 0.3567s^2 + 0.04072s + 0.001452}$$

4. Para controlar el pH del agua de riego se escogió el controlador en lazo cerrado PI, el mismo que se usa en la mayoría de plantas, en el cual la acción integral elimina el error en estado estacionario.
5. Con este trabajo se ha proporcionado un recurso tecnológico para el manejo del sistema de fertirrigación en SEBIOCA S.A. el mismo que se puede seguir adaptando a más requerimientos y bondades que este proporciona. El PLC y SCADA tienen los recursos suficientes para este crecimiento. En un futuro próximo se podrá expandir el alcance del proyecto a todos los invernaderos de la empresa, se podrá integrar más instrumentos de campo extendiendo la comunicación entre todos los instrumentos y equipos de control (cableado y/o enlaces de radio) y se tendrá una importante base de datos para análisis de resultados en corto, mediano y largo plazo.
6. Otras variables del proceso aún no consideradas se podrán medir, registrar y controlar mejorando considerablemente la calidad y cantidad de producción. Estas variables son la relación de caudal de la solución fertilizante y el agua de riego y la conductividad eléctrica (CE) del agua de riego. Otros aspectos a considerar en la automatización serán los sectores de riego y programa de tiempo.
7. Todos los instrumentos del sistema de fertirrigación deben contar con un plan de mantenimiento preventivo y calibración a fin de reducir el riesgo de daños y mediciones erradas. Cada procedimiento debe ser realizado de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes y por personal calificado.

BIBLIOGRAFÍA

- Fertilización, Tercera Edición, Carlos Cadahía López
- Hidráulica de Tuberías, Juan G. Saldarriaga V.
- "Principles and Practice of Automatic Process Control", Carlos A. Smith y Armando B. Corripio, John Wiley & Son, Inc (Traducido por Editorial Limusa).
- "Instrumentación industrial", Antonio Creus Solé, MARCOMBO, S.A.
- "Modern Control System, Ninth Edition", R.C. Dorf y R.H.Bishop, Prentice Hall.
- "MATLAB & SIMULINK": The Language of Technical Computing, Student. The Mathworks Inc.
- "Control Tutorial for MATLAB and SIMULINK: a Web-Based Approach", V.D.M. Tilbury.
- Software estándar para S7-300/400 PID Control (Regulación PID) Manual.

ANEXOS

Caudal consumo del invernadero de plantas madres	60 L/min o 3600L/h
Potencia de bomba de riego	0,75 HP
Bomba de inyección.	0-60 L/h 10 Bar 67,1 W 100-240Vac-1F-50,60Hz
Regulación de bomba de inyección	4-20mA
Tiempo de riego aplicado a Invernadero	30 min
Tipo principal de cultivo	Plantas madres de banano
Área total de invernaderos	18mx28m
Número de plantas	96
pH aproximado del agua de riego con fertilizantes, sin regulación.	7,2-7,5
pH del agua de riego requerido por las plantas	6,5

Tabla 1. Datos generales de la planta