

Controlador	Ess (%)	ts (s)
P	0.166	942
PI	0.173	1580
PD	0.241	952
Difuso	0.03	942
Difuso 2	0.143	945
Estabilización Robusta	0.271	945

Tabla 5.3: Respuesta de los controladores perturbando T_v con un escalón

Capítulo 6

Comportamiento ante perturbaciones en la temperatura de alimentación

La perturbación efectuada en la temperatura de alimentación fue un escalón, ya que ésta se puede presentar cuando se acaba el material a concentrar contenido en algún recipiente y se le agrega una cantidad almacenada en otro.

6.1. Comportamiento al perturbar la temperatura de alimentación con un escalón

Las figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6 muestran el comportamiento del sistema al ser perturbada la Temperatura de Alimentación con un escalón.

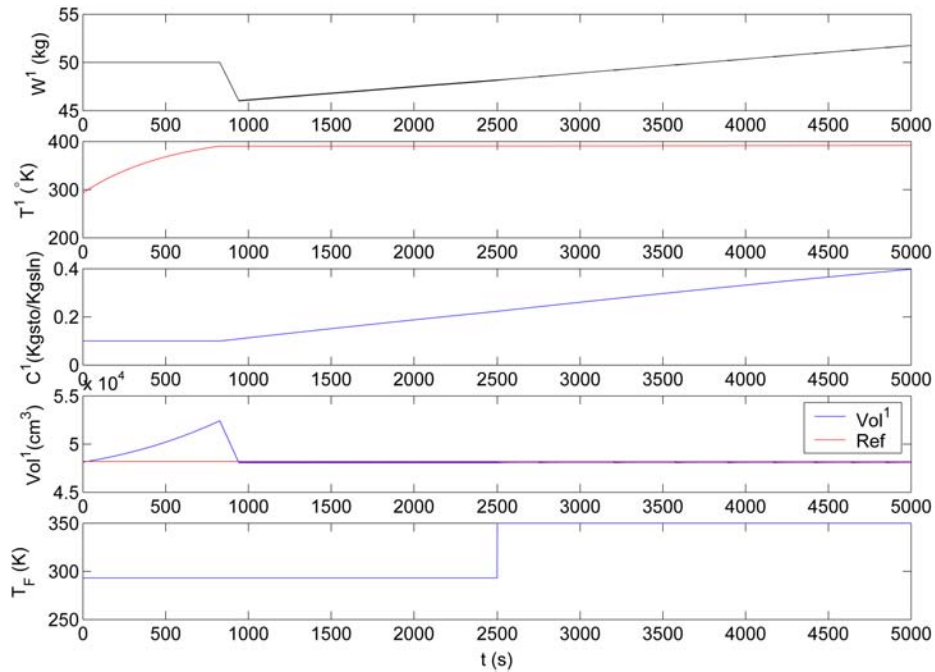


Figura 6.1: Control proporcional con la T_F perturbada con un escalón

6.2. Análisis de la respuesta del sistema perturbado para los diferentes controladores

La tabla 6.1, muestra el error en estado estable (E_{ss}) y tiempo de asentamiento (t_s) del sistema controlado al ser perturbada T_F con un escalón.

Al comparar la tabla 3.2 con 6.1, se nota que esta perturbación no afecta el desempeño del sistema controlado. Lo que significa que los controladores son poco sensibles a cambios en T_F , ya que una perturbación en T_F produce alteraciones en la respuesta menores al 0.1 %.

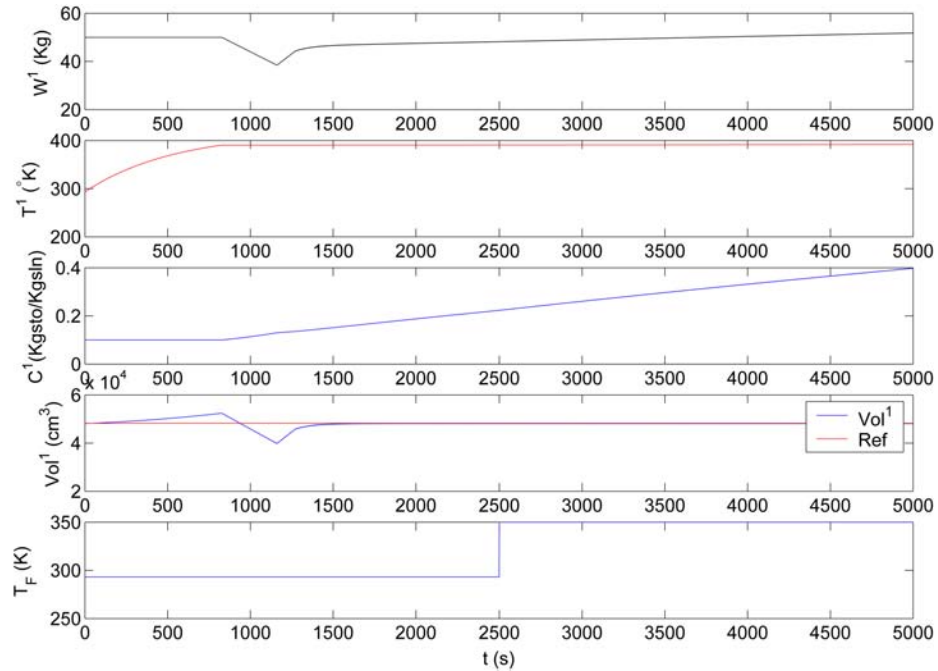


Figura 6.2: Control PI con la T_F perturbada con un escalón

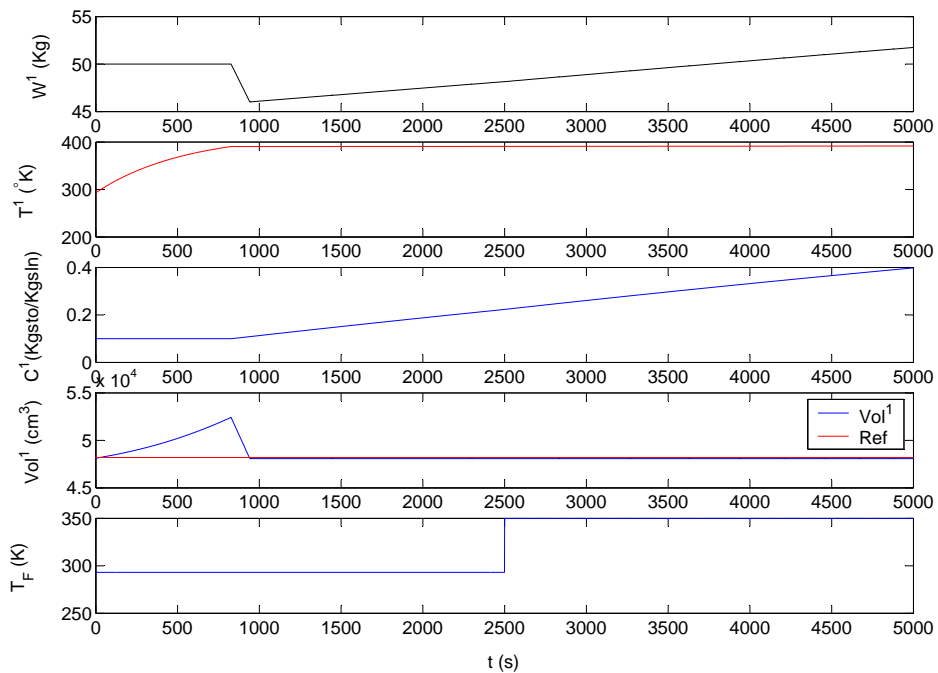


Figura 6.3: Control PD con la T_F perturbada con un escalón

6.2. Análisis de la respuesta del sistema perturbado para los diferentes controladores

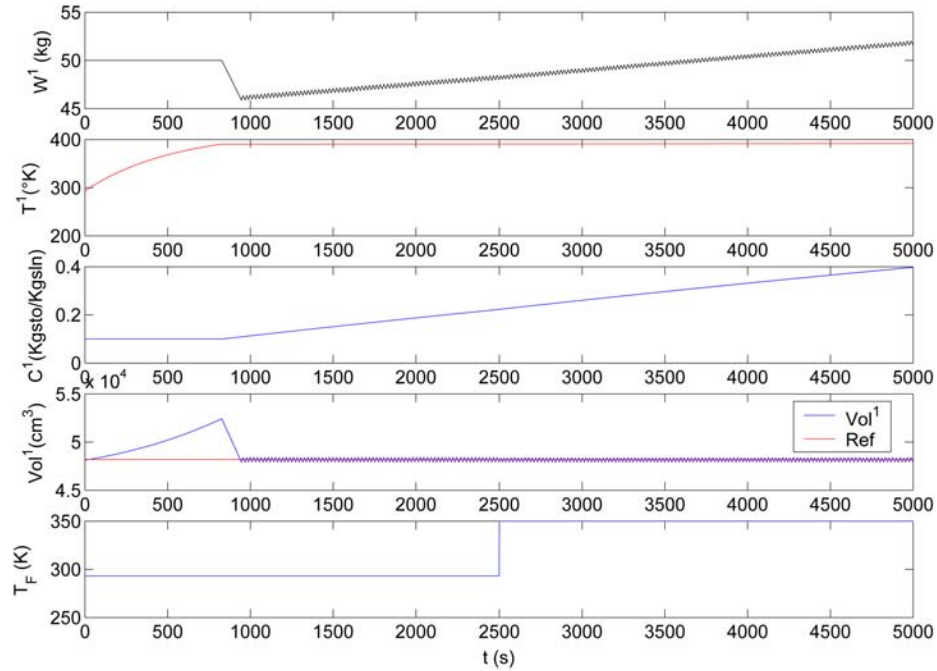


Figura 6.4: Control por estabilización robusta con la T_F perturbada con un escalón

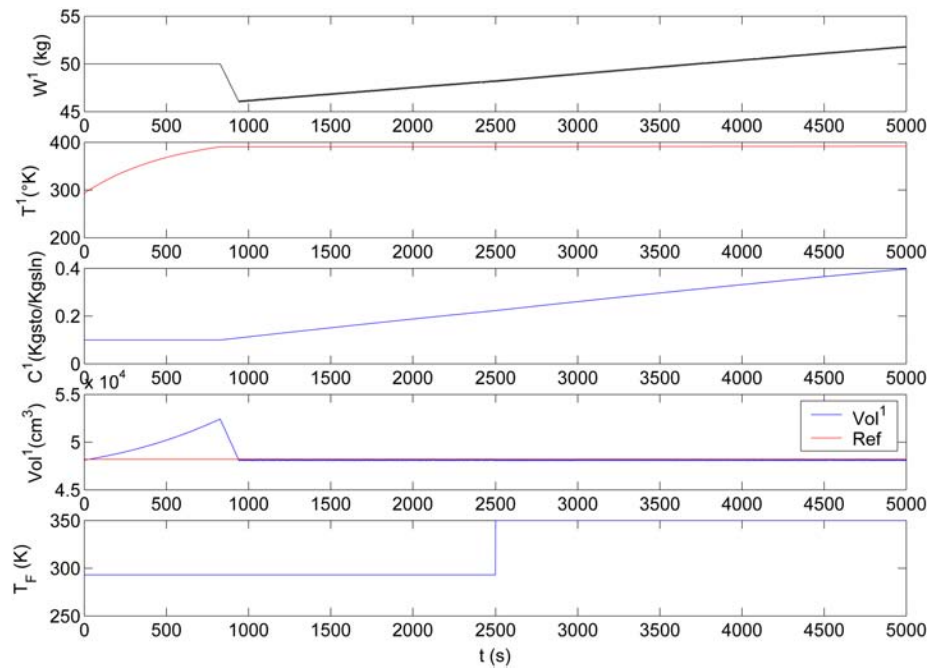


Figura 6.5: Control difuso con la T_F perturbada con un escalón

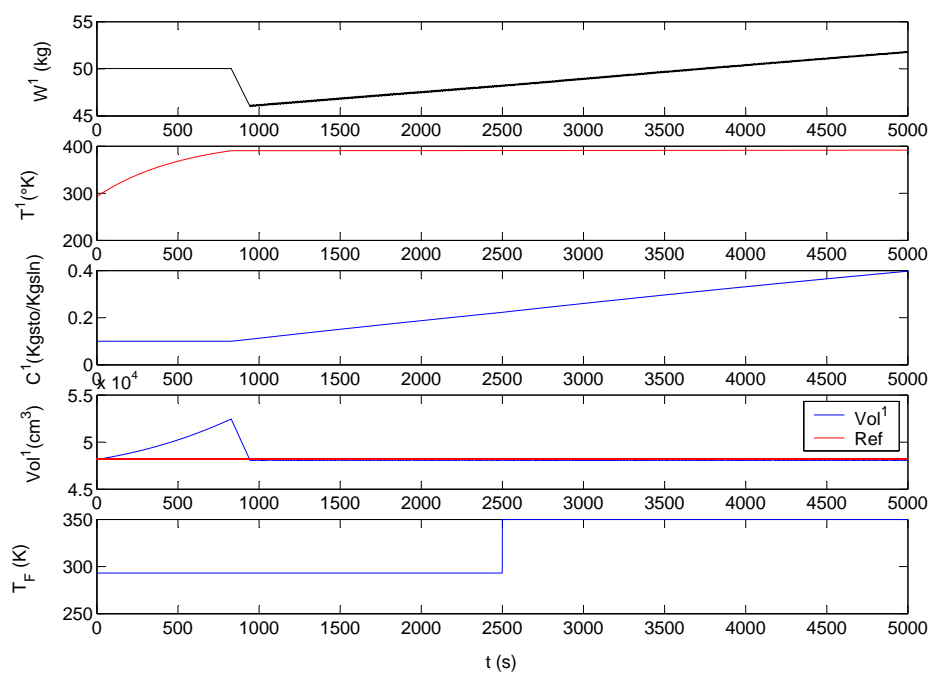


Figura 6.6: Control difuso modificado con la T_F perturbada con un escalón

Controlador	Ess (%)	ts (s)
P	0.233	942
PI	0.154	1570
PD	0.249	946
Difuso	0.123	942
Difuso 2	0.188	945
Estabilización Robusta	0.076	945

Tabla 6.1: Respuesta de los controladores perturbando T_F con un escalón

Capítulo 7

Primeros estudios de estabilidad basados en diagramas de bifurcaciones

En los modelos matemáticos correspondientes a la dinámica que describen el comportamiento de los sistemas físicos, se pueden presentar diferentes fenómenos de naturaleza no lineal. Estos se estudian de acuerdo con los siguientes aspectos:

1. *Inherentes al proceso*: Se pueden presentar fenómenos como saturación, bifurcaciones, caos, ciclos límites, cuasiperiodicidad, etc...
2. *Inherentes a los dispositivos mecánicos y eléctricos*: Saturación de actuadores, histéresis, zona muerta, etc.

El fenómeno de bifurcación significa, que cambios cuantitativos en los parámetros llevan a un cambio cualitativo en el comportamiento del sistema. El caos como tal es la

característica de impredecibilidad de la salida del sistema, lo que significa que la salida es extremadamente sensible a las condiciones iniciales [Slotine y Li , 1991].

Para analizar la presencia de bifurcaciones y caos, observamos el comportamiento del sistema en estado estable, con la variación de un parámetro. Como el sistema por sí mismo es inestable se analiza el sistema controlado. Estos análisis son hechos únicamente a nivel de simulación y respetando en lo posible los rangos de las variables, la comprobación experimental se deja para trabajos posteriores.

7.1. Control proporcional de nivel para simple efecto

En la sección 3.3, se presentaron controladores para el evaporador en simple efecto, en esta sección se mostrará el comportamiento del sistema en la medida que se varían diversos parámetros.

La figura 7.1 muestra un diagrama de variación de la temperatura de Alimentación (T_F^1) y su influencia con el volumen del sistema. Se puede observar claramente la presencia de bifurcaciones y caos, mostrando la transición desde un punto de dinámica 1-T, hasta llegar a un 6-T atravesando por un régimen caótico. Se puede concluir que el rango de variación es muy pequeño, por lo cual no afecta el control del sistema.

La figura 7.2 muestra el comportamiento del volumen del sistema ante una variación en la temperatura del vapor vivo de caldera (T_v). En 7.3, se observa la misma simulación en un rango más pequeño donde se nota la presencia de bifurcaciones.

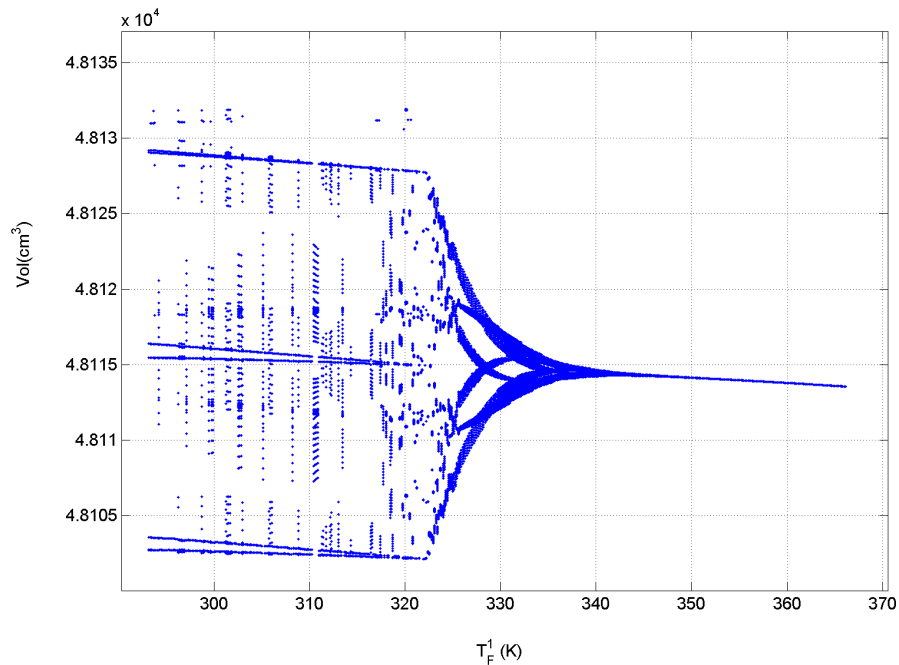


Figura 7.1: Comportamiento del volumen con la variación de T_F^1

Las figuras 7.4 y 7.5 muestran la variación de volumen con respecto a la presión. Se puede observar claramente la presencia de caos en él.

La figura 7.6 muestra la variación del volumen con el cambio en la constante proporcional del controlador (K), se nota la presencia de una banda caótica en la respuesta del sistema, pero esta oscila en un rango muy pequeño, por tal razón no afecta en sobremedida la regulación del sistema controlado.

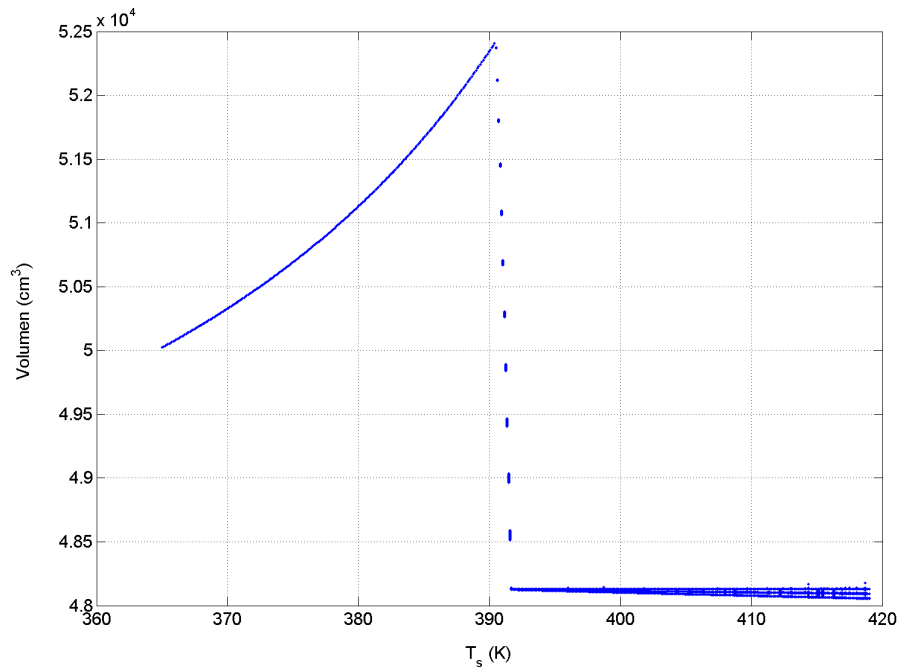


Figura 7.2: Comportamiento del volumen con la variación de T_v

7.2. Control proporcional de nivel y la concentración para simple efecto

Para el controlador diseñado en la sección 3.4 para nivel y concentración, también se encontró la presencia de este tipo de fenómenos no lineales.

Al igual que en la sección anterior, se encontraron fenómenos al variar las mismas variables, algunos de los cuales tienen comportamientos similares a los ya encontrados.

La figura 7.7 muestra la variación del volumen con relación a la Temperatura de Alimentación se observa la presencia de una zona 1-T, otra 6-T y diferentes zonas donde se encuentra la presentación de caos en el sistema.

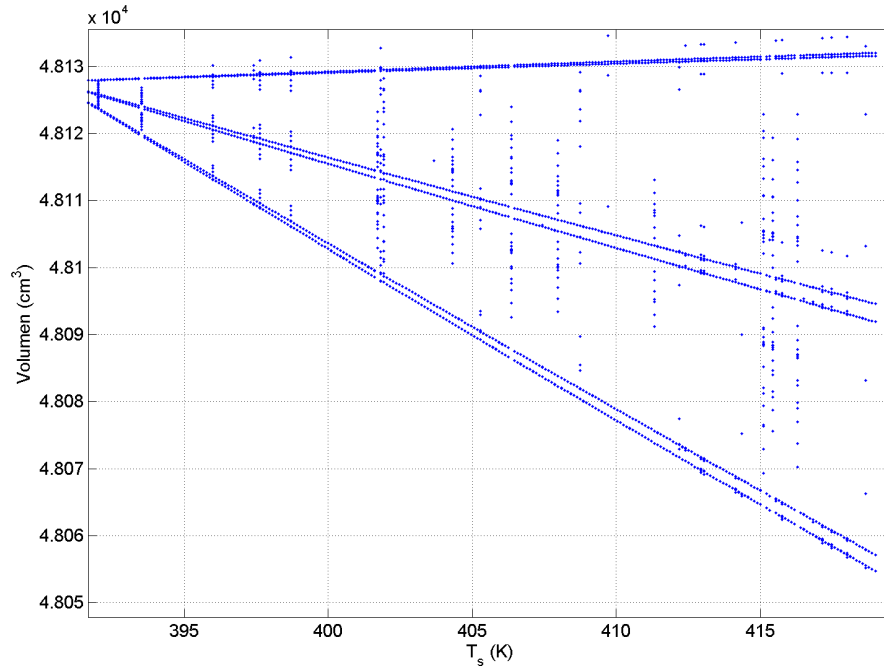


Figura 7.3: Comportamiento del volumen con la variación de T_v

La variación del volumen con respecto a la temperatura del vapor se muestra en las figuras 7.8 y 7.9, donde se observa la transición de una órbita 1-T a otra 6-T periódica.

En las figuras 7.10 y 7.11 se observa la variación del volumen con respecto a la variación de la presión, es claro la presencia de caos y bifurcaciones en esta simulación.

7.3. Control PI para nivel

Para el controlador diseñado en la sección 3.5 para nivel, también se encontró la presencia de este tipo de fenómenos no lineales.

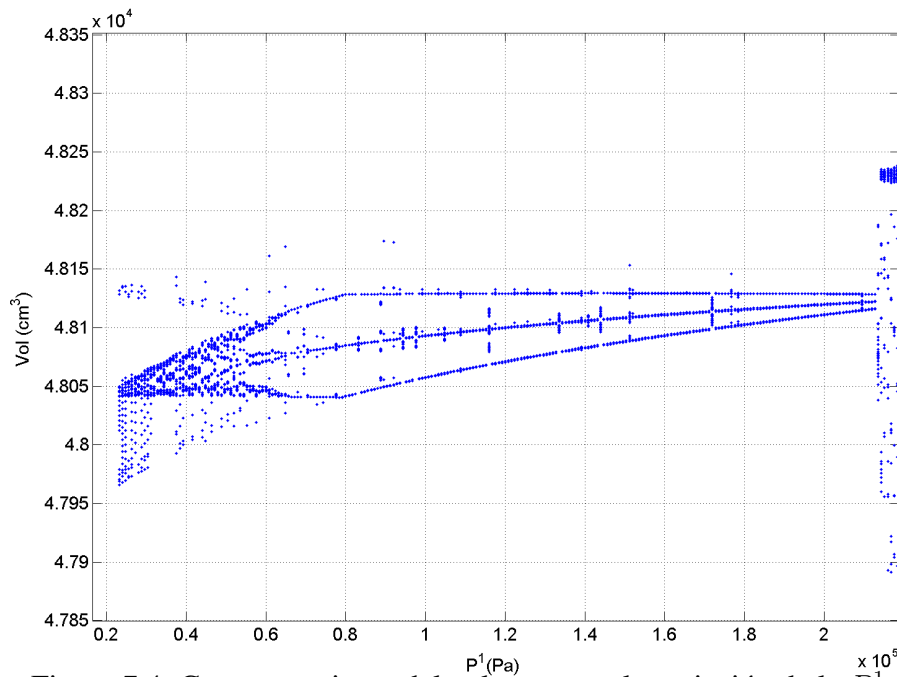


Figura 7.4: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

La figura 7.12 y 7.13 muestra la variación del volumen con relación a T_v se observa la presencia de una banda caótica en el desempeño del sistema.

En las figuras 7.14 y 7.15 se observa la variación del volumen con respecto a la variación de la presión, es claro la presencia de una banda caótica, además el problema que a baja presión el sistema no hace regulación.

Las figuras 7.16 y 7.17, muestran la variación del volumen con el cambio en la constante integral y proporcional del controlador respectivamente, se observa como el sistema regula adecuadamente para un $K_i < 0,7$ y/o para un $K_p > 4,4$, en otros rango el sistema es caótico.

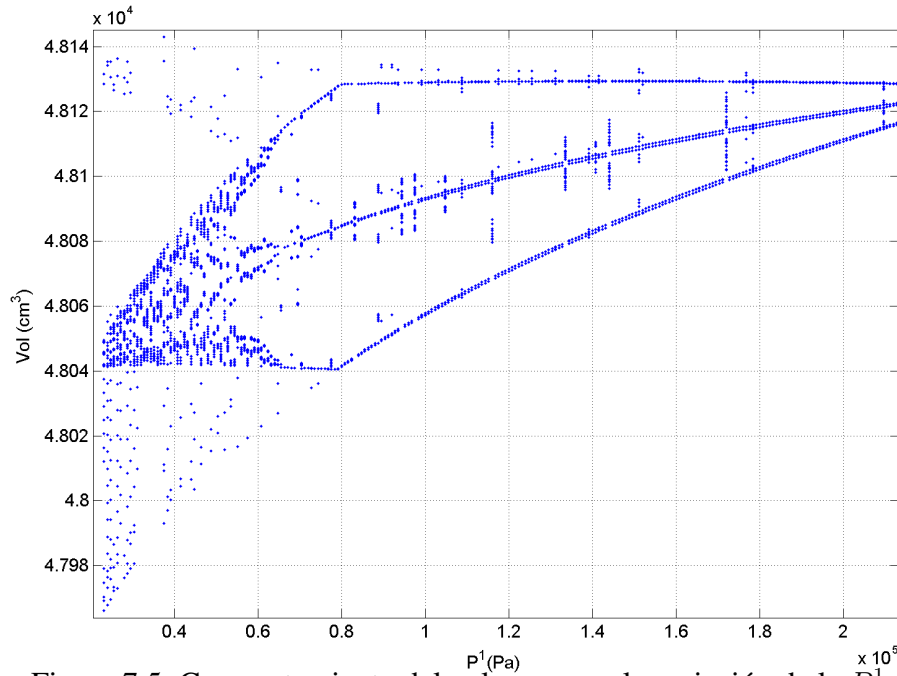


Figura 7.5: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

7.4. Control PD para nivel

Para el controlador diseñado en la sección 3.6 para nivel, también se encontró la presencia de este tipo de fenómenos no lineales.

La figura 7.18 muestra la variación del volumen con relación a T_v se observa la caída de volumen en la temperatura de saturación.

En las figuras 7.19 se observa la variación del volumen con respecto a la variación de la presión, es claro la pérdida de regulación a baja presión.

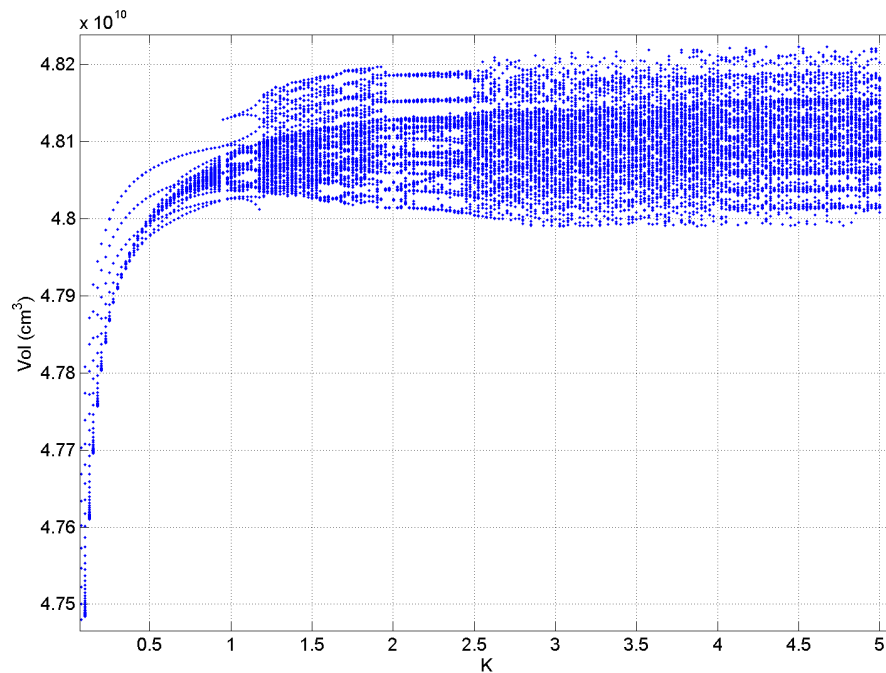


Figura 7.6: Comportamiento del volumen con la variación de K

Las figuras 7.20 y 7.21, muestran la variación del volumen con el cambio en la constante integral y proporcional del controlador respectivamente, se observa como el sistema no regula a baja presión, y para $K_d > 1,95$ y/o para un $K_p > 0,035$, el sistema es caótico.

7.5. Control difuso para nivel

Para el controlador diseñado en la sección 3.7 para nivel, también se encontró la presencia de este tipo de fenómenos no lineales.

En las figuras 7.22 y 7.23 se observa la variación del volumen con respecto a la varia-

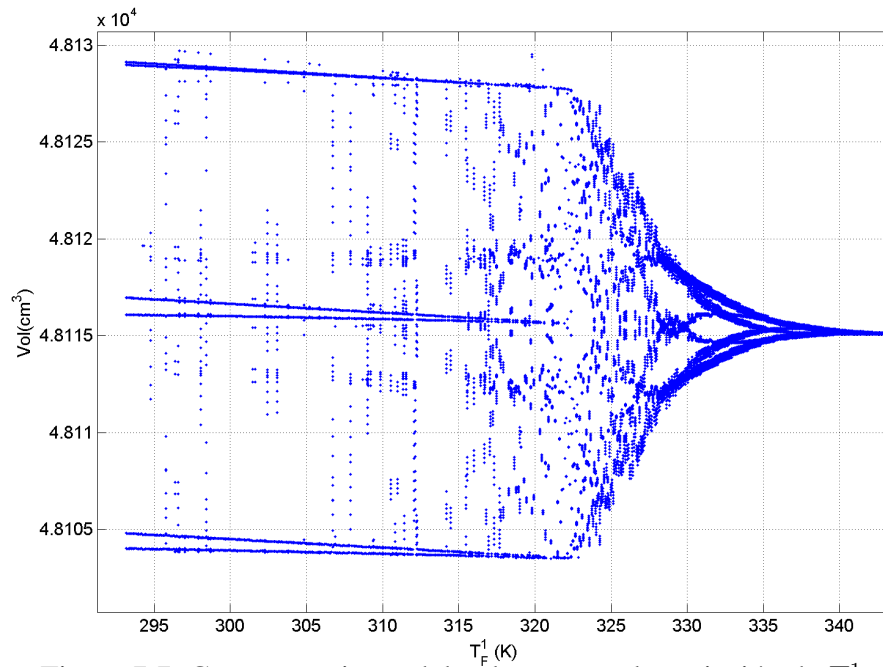


Figura 7.7: Comportamiento del volumen con la variación de T_F^{-1}

ción de la presión, es claro la presencia de una banda caótica, además el problema que a baja presión el sistema no hace regulación.

7.6. Control difuso modificado para nivel

Para el controlador diseñado en la sección 3.8 para nivel, también se encontró la presencia de este tipo de fenómenos no lineales.

En la figura 7.24 se observa la variación del volumen con respecto a la variación de T_v , es claro la caída de volumen en la temperatura de saturación y la presencia de una banda caótica.

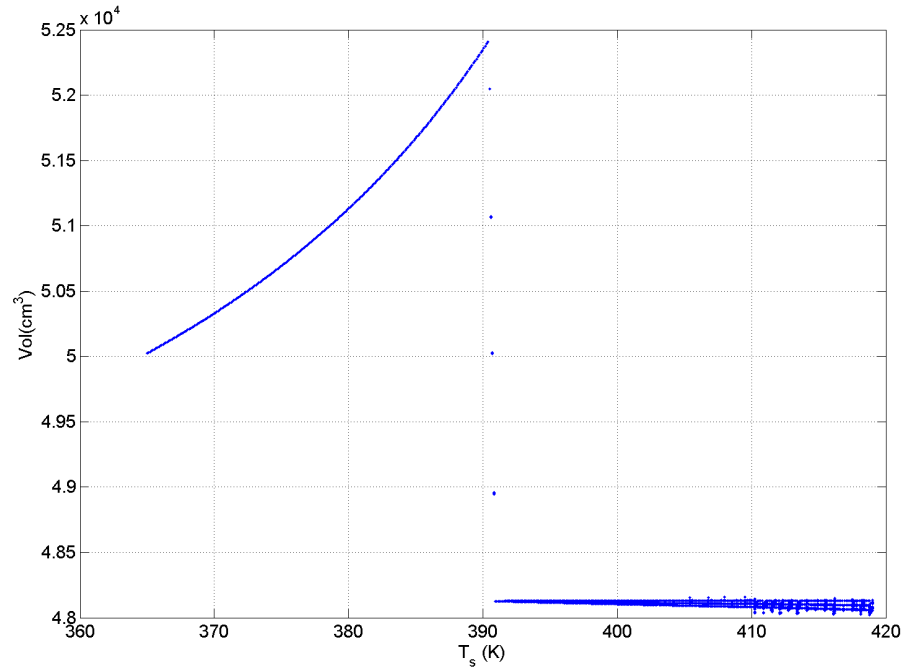
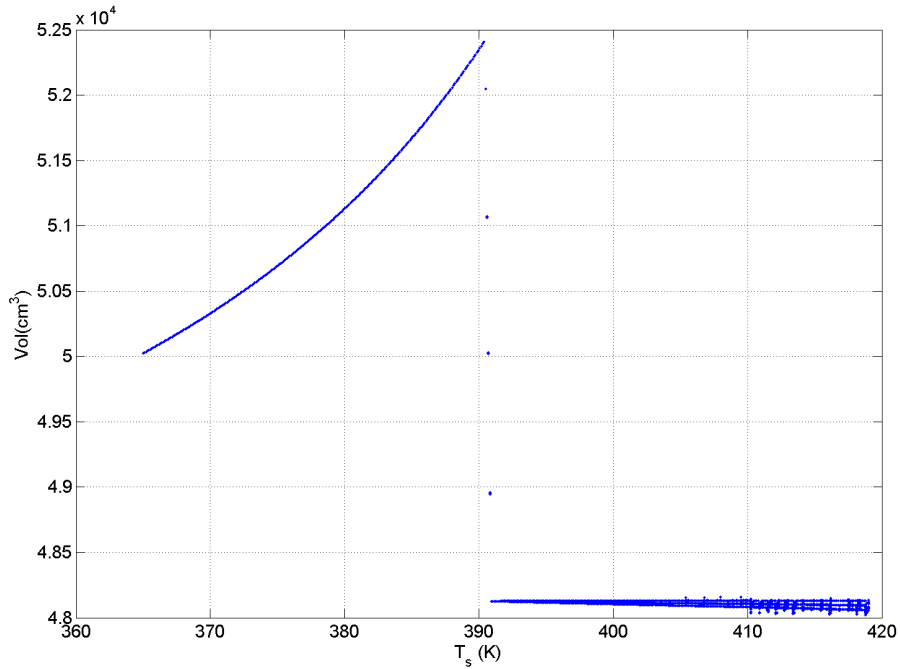
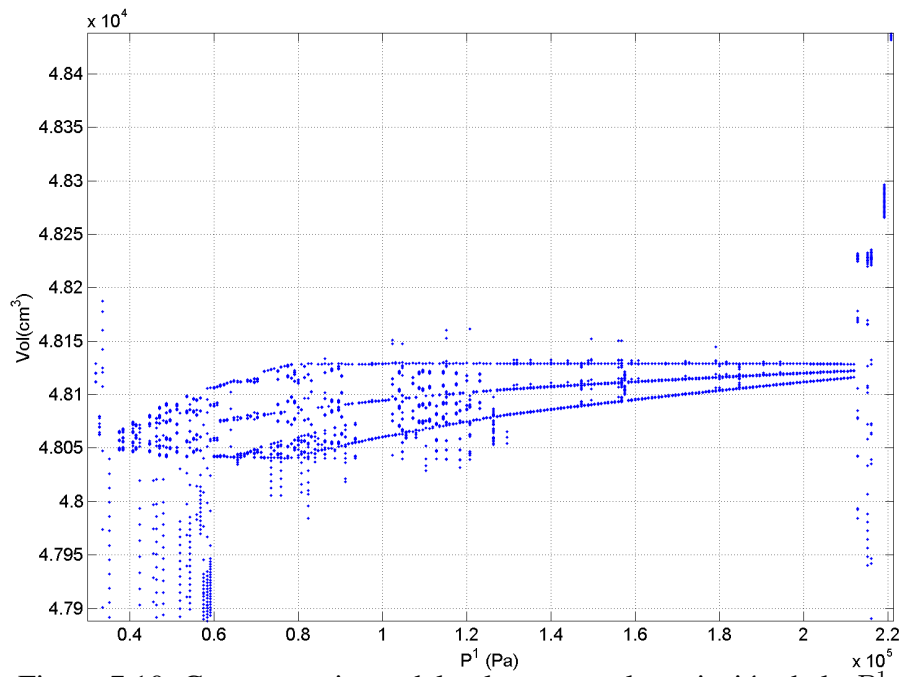


Figura 7.8: Comportamiento del volumen con la variación de T_v

En la figura 7.25 se observa la variación del volumen con respecto a la variación de la presión, es claro el problema que a baja presión el sistema no hace regulación.

7.7. Aclaraciones con respecto a control por estabilización robusta

Para este controlador no se encontró ningún fenómeno, ya que en los rangos simulados siempre regulaba de igual manera.

Figura 7.9: Comportamiento del volumen con la variación de T_v Figura 7.10: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

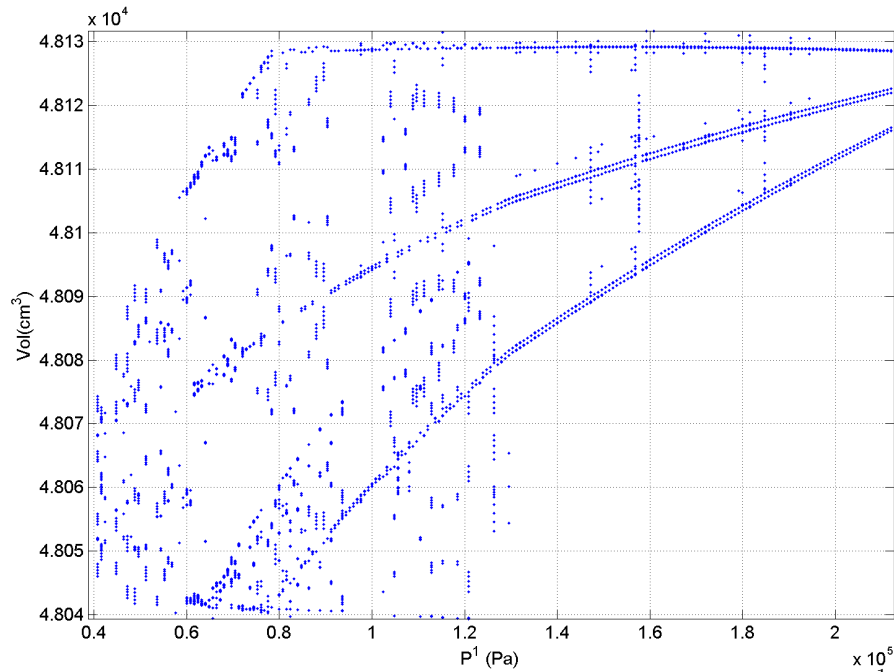


Figura 7.11: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

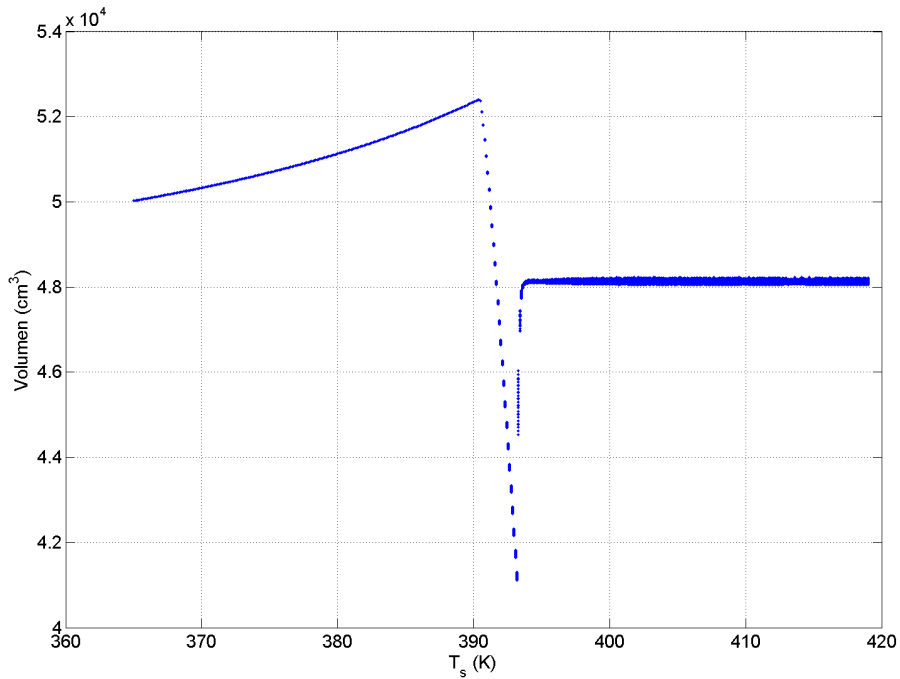


Figura 7.12: Comportamiento del volumen con la variación de T_v

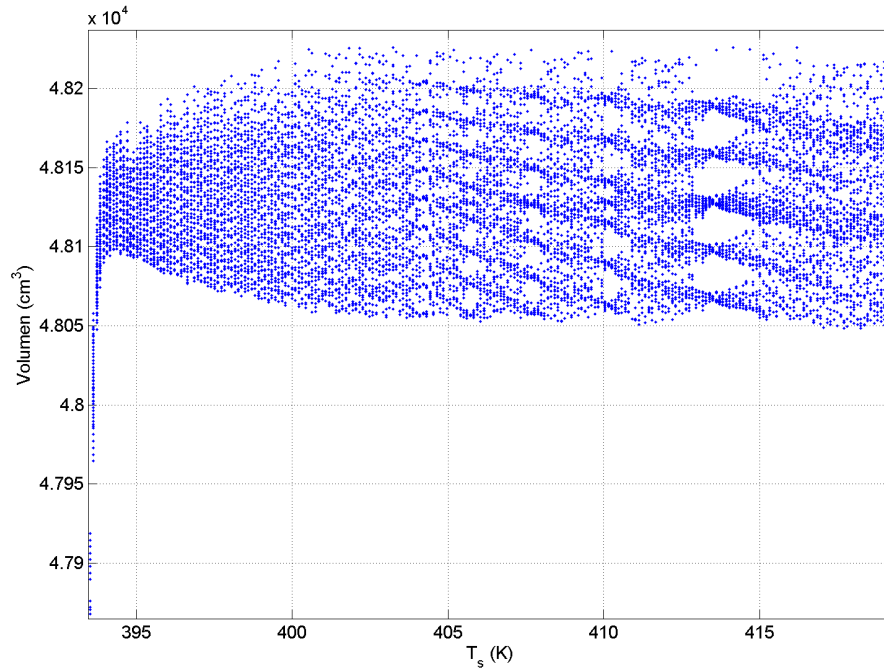


Figura 7.13: Comportamiento del volumen con la variación de T_v

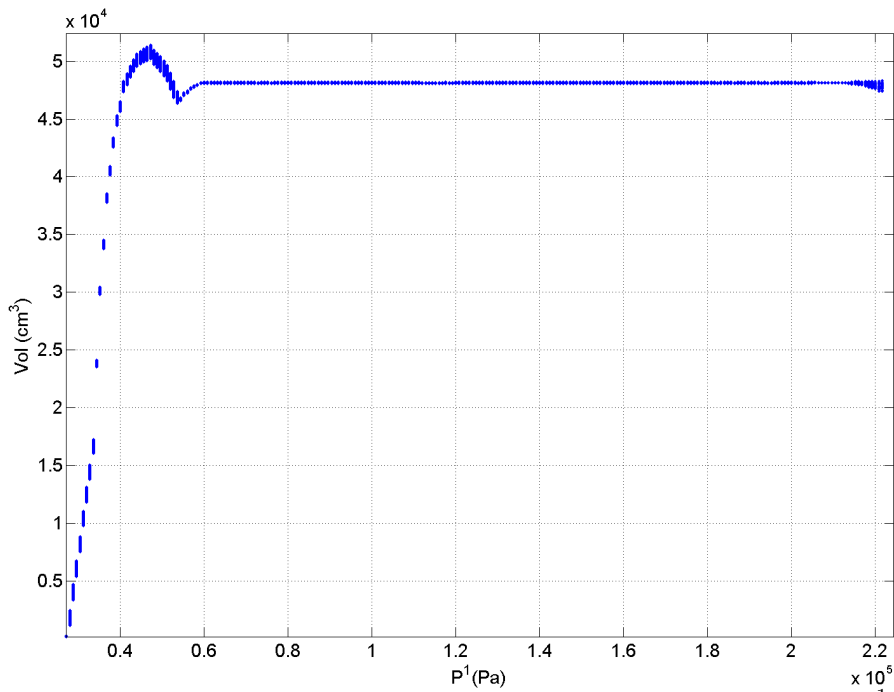


Figura 7.14: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

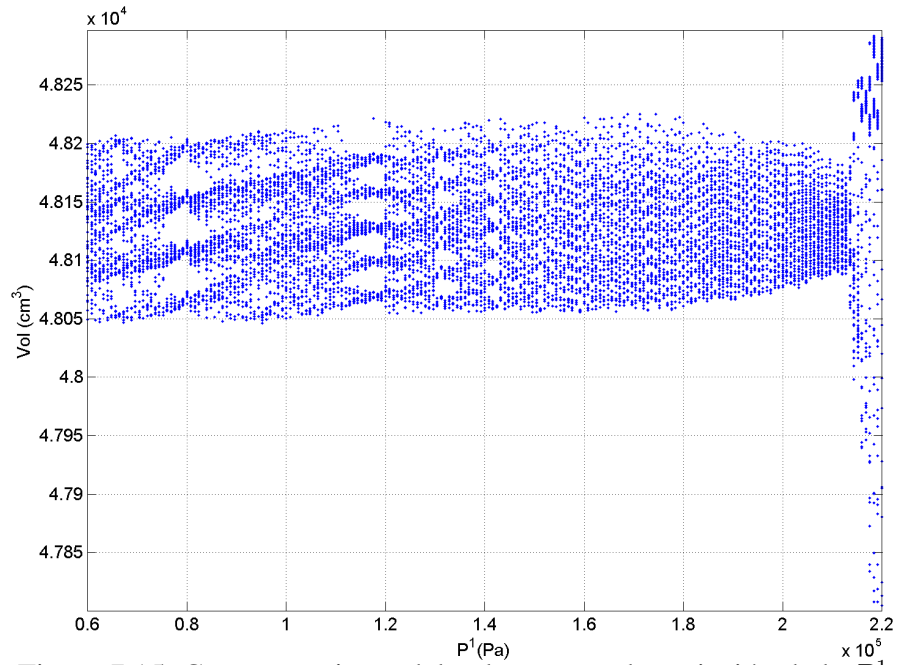


Figura 7.15: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

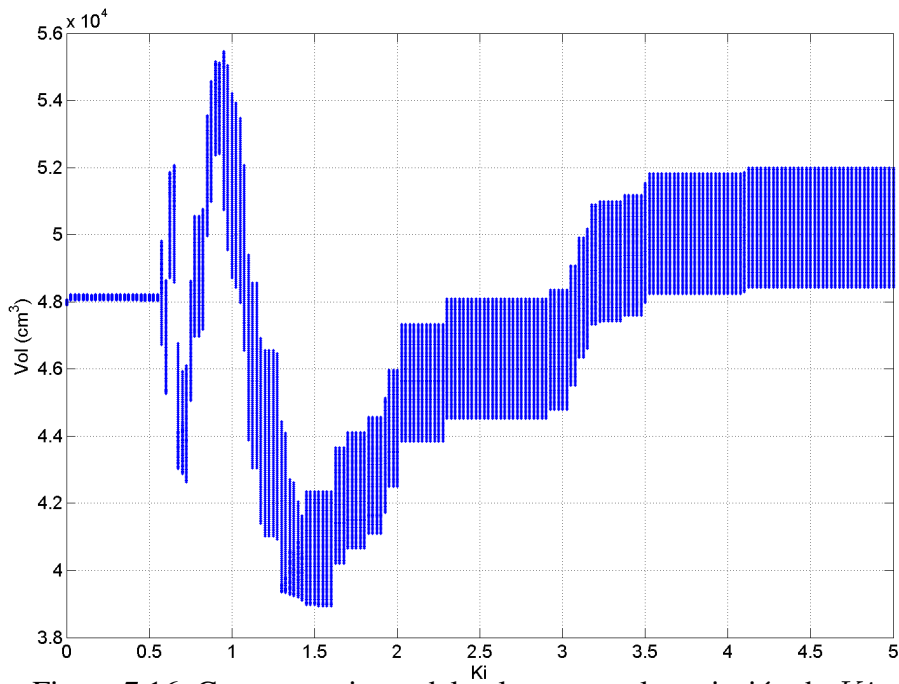
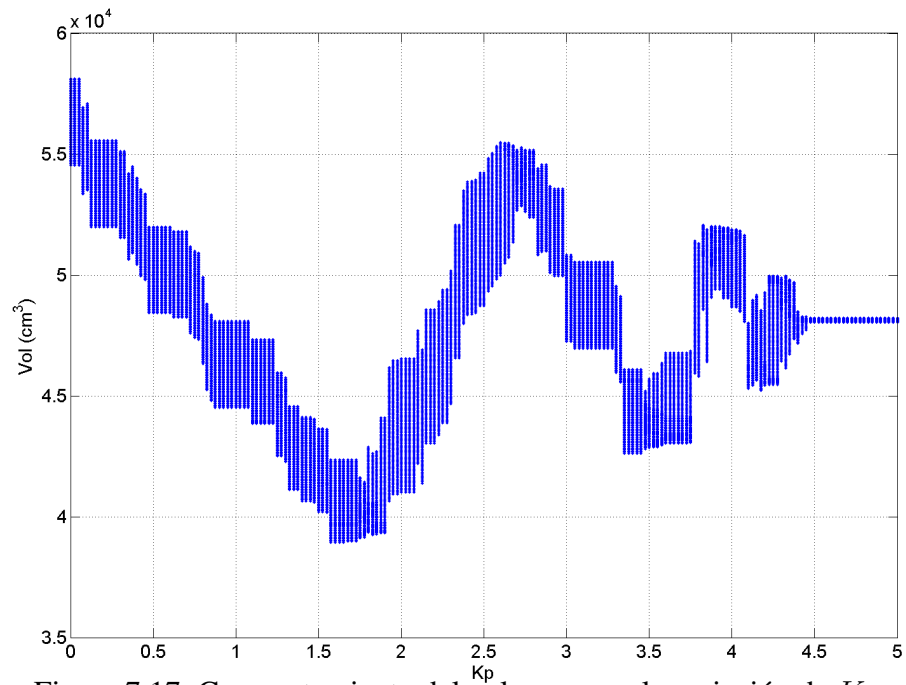
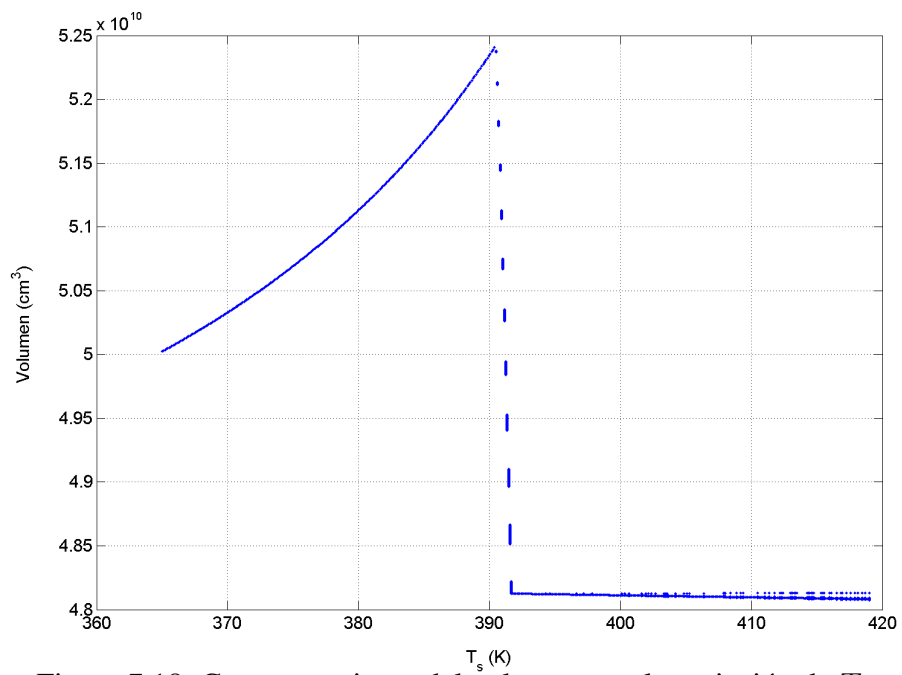
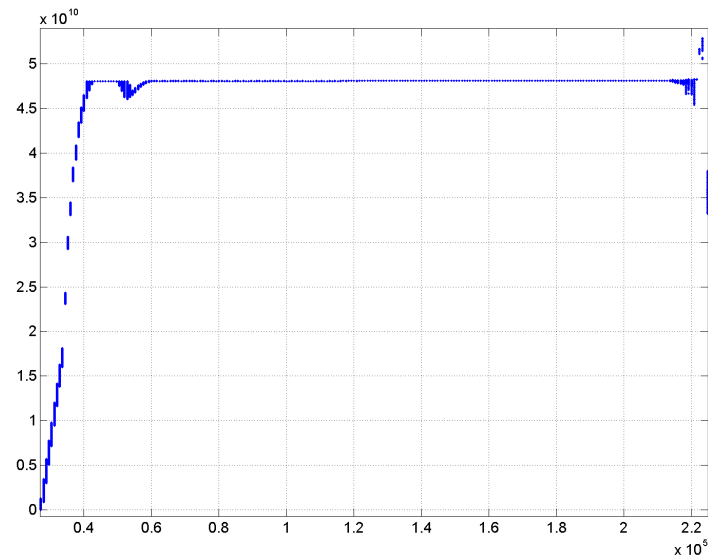
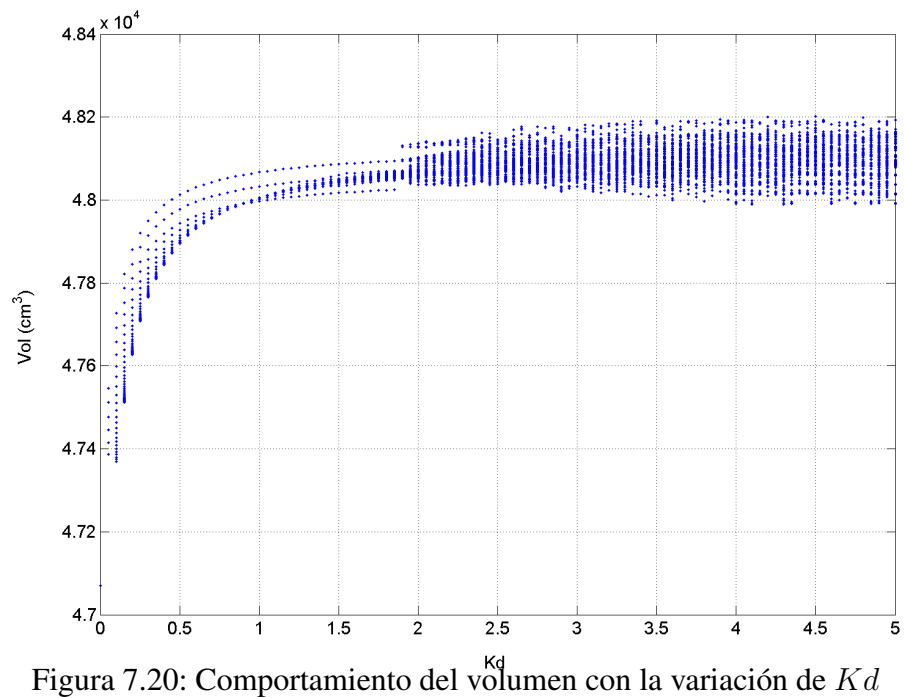


Figura 7.16: Comportamiento del volumen con la variación de K_i

Figura 7.17: Comportamiento del volumen con la variación de K_p Figura 7.18: Comportamiento del volumen con la variación de T_v

Figura 7.19: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1 Figura 7.20: Comportamiento del volumen con la variación de Kd

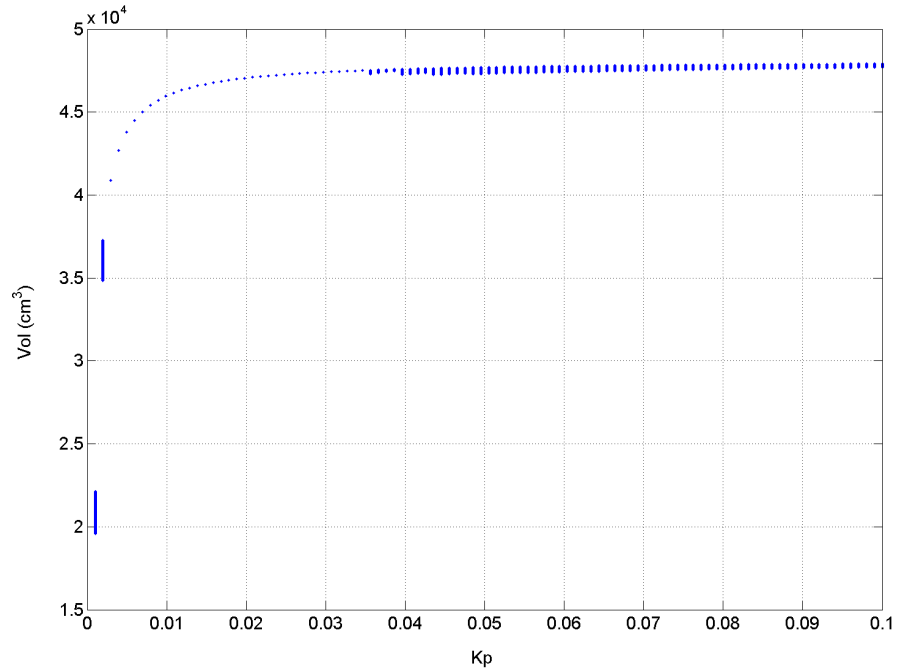


Figura 7.21: Comportamiento del volumen con la variación de Kp

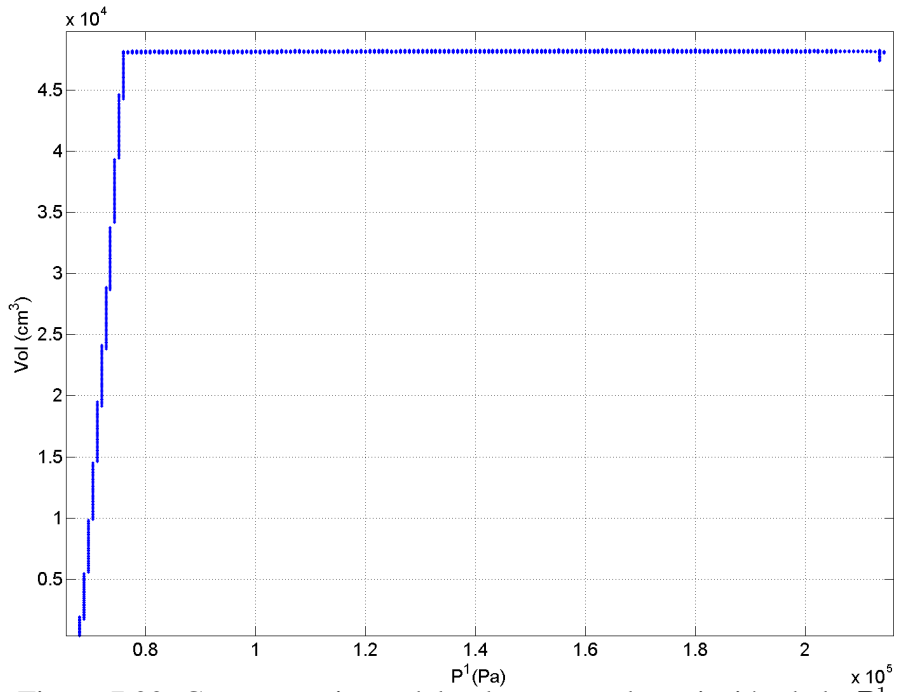


Figura 7.22: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

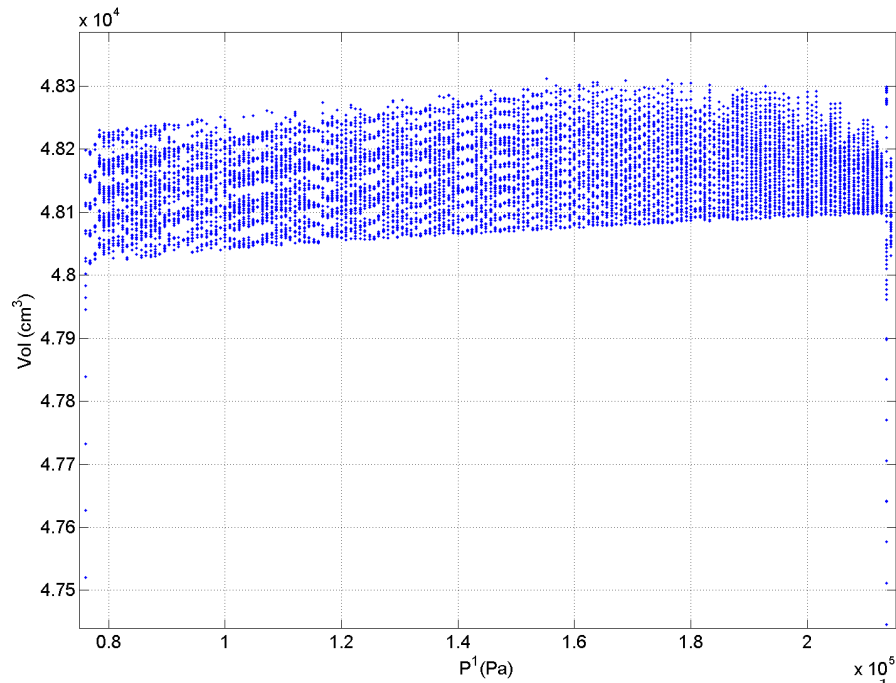


Figura 7.23: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

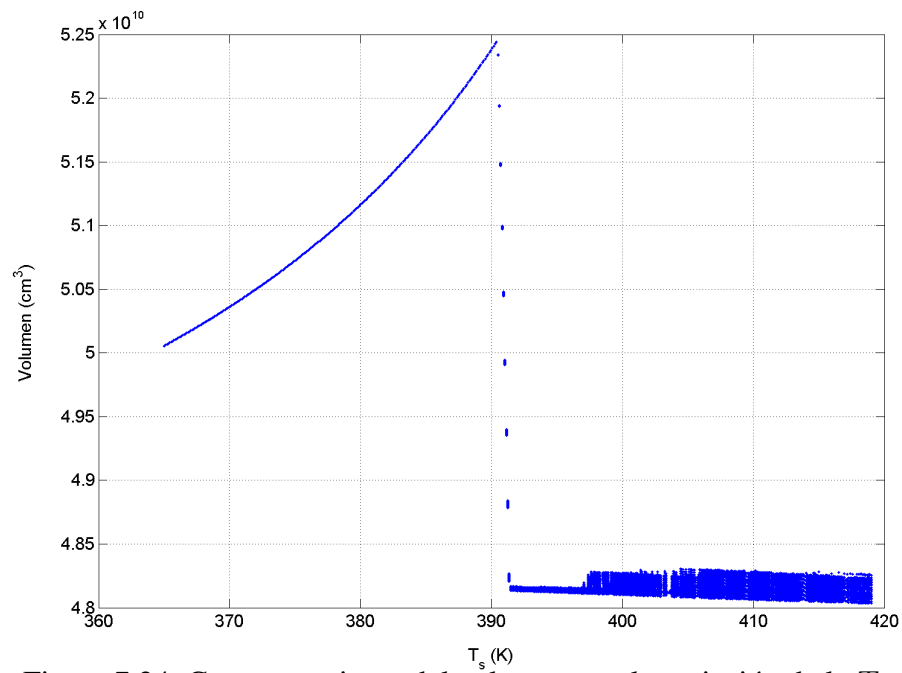


Figura 7.24: Comportamiento del volumen con la variación de la T_v

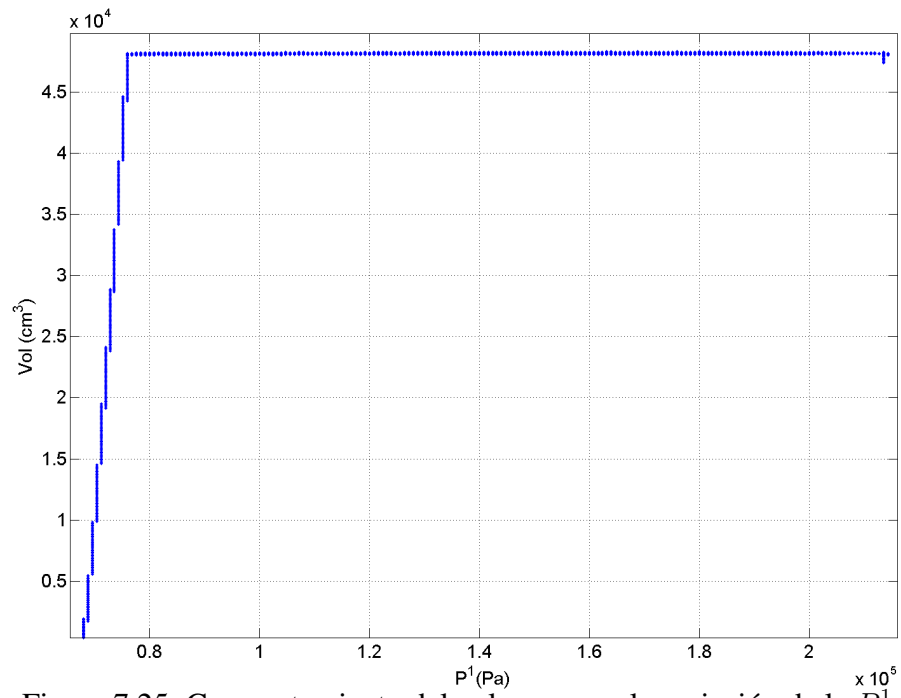


Figura 7.25: Comportamiento del volumen con la variación de la P^1

Capítulo 8

Sistema de Instrumentación

Todo sistema de control, necesita de una instrumentación con el fin de medir adecuadamente las variables de proceso y dar las señales a los actuadores para así minimizar el error.

Un sistema de instrumentación es una estructura compleja que agrupa un grupo de instrumentos, un dispositivo o sistema en que se mide, unas conexiones entre estos y unos programas que se encargan de automatizar el proceso y de garantizar la repetibilidad de las medidas. El objetivo básico de éste es la adquisición de información del mundo físico, con la mayor exactitud que se pueda obtener y con el menor coste [Riu *et al* , 1995].

El tren de evaporadores de laboratorio de procesos, fue adecuado con sensores de presión, y temperatura, tarjetas de adquisición de datos para las señales de estos sensores, un PLC para manejo de variables, un touch-screen para visualización y se diseñó la comunicación con el computador mediante protocolo RS-485 con conectividad DDE.

A continuación se hablará en detalle algunos de los elementos del sistema de instrumentación.

8.1. Termocuplas

Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Éstas se hacen con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente).

La medición de temperatura utilizando termocuplas se basa en tres principios físicos, que son: Efecto Seebeck, Efecto Peltier y Efecto Thomson.

Existen industrialmente una gran cantidad de tipos de termocuplas, pero casi el 90 % de las termocuplas utilizadas son del tipo J ó del tipo K. La tipo K es utilizada en ambientes corrosivos, por lo cual se optó por utilizar ésta para el sistema de evaporadores.

Una termocupla instalada, es mostrada en la figura 8.1

8.2. Sensores de Presión

Un sensor de presión utiliza una lámina delgada como un puente de resistencia donde la presión de operación es transmitida a través de un diafragma cerámico. La tensión de salida es convertida del diafragma por un amplificador en una salida de corriente de 4 a 20 mA o una salida de tensión de 0 a 10 V. La tensión o corriente de salida son proporciona-



Figura 8.1: Termocupla instalada

les a la presión de entrada. Los sensores de presión utilizados son 7MF1560-3BE00+H1Y. Su conexión eléctrica se muestra en las figuras 8.2 y 8.3 respectivamente. Un sensor instalado, se destaca en la figura 8.4.

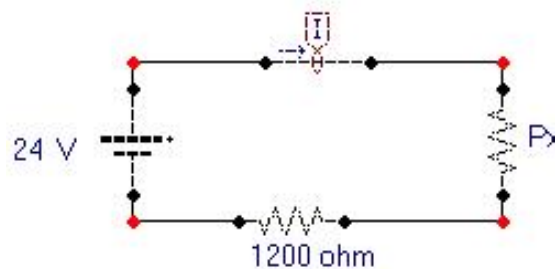


Figura 8.2: Conexión eléctrica sensor de presión 7MF1560-3BE00+H1Y

8.3. Protocolo Serial RS-485

RS-485 es un sistema de transmisión de datos que usa señales diferenciales balanceadas. Es una red multipunto que puede tener hasta 32 pares maestro/receptor. El emisor y

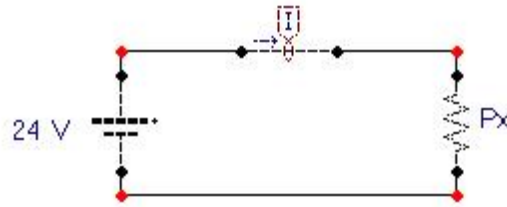


Figura 8.3: Conexión eléctrica sensor de presión



Figura 8.4: Sensor de presión instalado

el receptor deben tolerar tensiones en el rango +12 a -7 V dc. Redes Típicas RS-485 a 2 y a 4 hilos son mostradas en las figuras 8.5 y 8.6 respectivamente[B & B Electronics , 1997].

La red montada en laboratorios para equipos, funciona bajo RS-485 a 2 hilos.

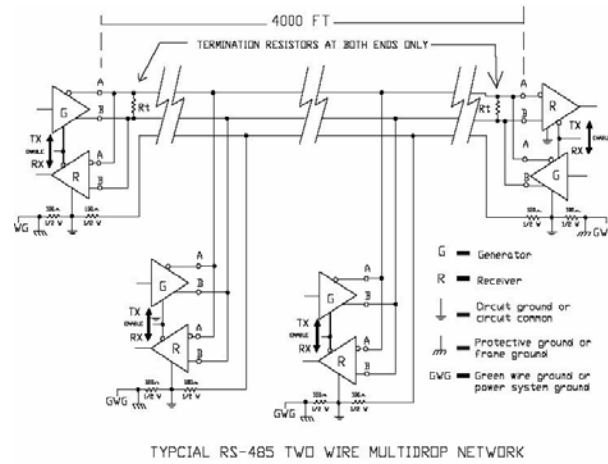


Figura 8.5: Red Típica RS-485 a 2 hilos

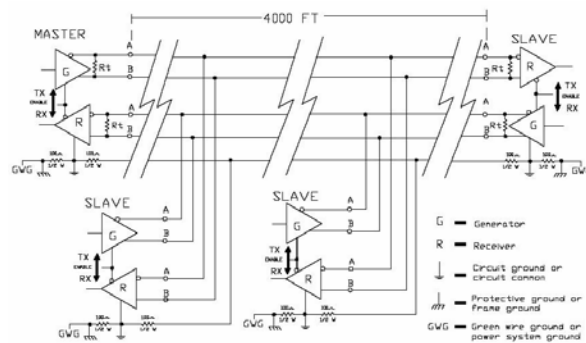


Figura 8.6: Red Típica RS-485 a 4 hilos

8.4. Controlador Lógico Programable (PLC)

La definición dada por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) es: “Un Controlador Lógico Programable es un dispositivo electrónico digital que utiliza una memoria para almacenar instrucciones e implementar funciones específicas de lógica, secuencia, temporizado, conteo y aritmética para controlar máquinas y procesos”.

Un PLC es una máquina electrónica diseñada para controlar en tiempo real y en medio industrial procesos secuenciales. Realiza funciones lógicas: series, paralelas, temporizaciones, contajes, cálculos, regulaciones, entre otras. También se puede definir como un dispositivo en el que existen terminales de entrada a los que se conectarán pulsadores, finales de carrera, detectores, y sensores; terminales de salida a los que se conectarán bobinas de contactores, electroválvulas, lámparas, u otros, de tal forma que la actuación de estos últimos está en función de las señales de entrada que estén activadas en cada momento, según el programa almacenado [Perry *et al* , 1992].

Esto quiere decir que los elementos tradicionales como relés auxiliares, relés de enclavamiento, temporizadores y contadores son internos.

8.4.1. Estructura Externa

Se refiere al *aspecto físico exterior del mismo*, es decir bloques o elementos en que está dividido. Las estructuras externas más significativas en el mercado son:

- *Estructura Compacta*: en la cual en un solo bloque se encuentran todos sus componentes.
- *Estructura Modular*: el estándar americano separa las entradas y salidas del resto del controlador y el estándar europeo utiliza un módulo para cada función

8.4.2. Estructura Interna

Son las partes en que se ordena su conjunto físico o hardware y las funciones y funcionamiento de cada una de ellas.

8.4.2.1. Sección de entradas

Mediante la interfaz adapta y codifica de manera comprensible por la CPU las señales procedentes de los dispositivos de entrada o captadores, también tiene misión de protección de los circuitos electrónicos internos del controlador haciendo una separación eléctrica entre estos y los captadores.

Se clasifican según su tensión y según el tipo de señal:

Según su tensión:

- Libres de Tensión
- Corriente Continua
- Corriente Alterna

Según el tipo de señal:

- Analógicas
- Digitales

8.4.2.2. Unidad Central de Procesos (CPU)

Esta es la inteligencia del sistema, en función de los valores de entrada, activa las salidas deseadas, constituida por procesador, memoria y circuitos auxiliares asociados.

8.4.2.3. Sección de Salidas

Decodifica las señales procedentes de las CPU, las amplifica y manda con ellas los dispositivos de salida. También sirve como protección de circuitos internos.

Se clasifican en salidas a relé y a triac con corriente alterna; salidas a transistor con corriente continua y salidas analógicas y digitales siendo estas últimas las más usadas.

8.4.2.4. Unidad de alimentación

Adapta la tensión de la red (120V, 60Hz) a la de funcionamiento de los circuitos electrónicos internos del controlador, así como a los dispositivos de entrada (generalmente 24V DC).

8.4.2.5. Unidad de consola o programación

Por medio del cual se accede al interior de la CPU para cargar en memoria los programas. Sus funciones principales son: Introducción de instrucciones, búsqueda de posiciones de memoria, modificación del programa, detección de errores de sintaxis o formato, visualización del programa de usuario, grabación de programas, visualización y verifica-

ción dinámica del programa.

8.4.2.6. Interfaces

Dispositivos electrónicos que permiten la comunicación de la CPU con el exterior llevando la información acerca del estado de las entradas y transmitiendo las órdenes de activación de las salidas. También permiten la introducción, verificación y depuración del programa mediante la consola de programación.

8.4.2.7. Memorias

Se refiere a cualquier dispositivo que nos permita almacenar información en forma de bits. Los chips de memoria suelen estar organizados en octetos y a su vez, estos en palabras que normalmente son de 16 bits. Hay memorias de usuario, de la tabla de datos, del sistema, EPROM y EEPROM.

- **Memoria de usuario:** Donde se graba el programa de usuario (RAM). En algunos controladores esta se auxilia de una memoria sombra tipo EEPROM.
- **Memoria y programa del sistema:** Esta memoria y el procesador conforman la CPU. Se divide en dos: memoria del sistema tipo RAM y la que corresponde al programa del sistema tipo ROM.
- **Memorias EPROM y EEPROM:** Son de gran aplicación como memorias copia para grabación y archivo de programas de usuario.

8.4.3. El PLC Direct Logic Koyo D06DA

Es un controlador lógico programable (PLC) compacto. Su configuración de entrada/salida se distribuye en 20 entradas DC a 24 V (X1 - X13 en formato octal), 9 salidas por triac de 17 - 240 V AC (Y1 - Y17 en formato octal). Tiene 4 Rack's de expansión para tarjetas. Posee además dos puertos de comunicaciones DB compatibles con RS-485, que soportan los protocolos Modbus RTU, K-sequence y Direct-Net, además el puerto dos puede ser Modbus maestro. Este se muestra en la figura 8.7

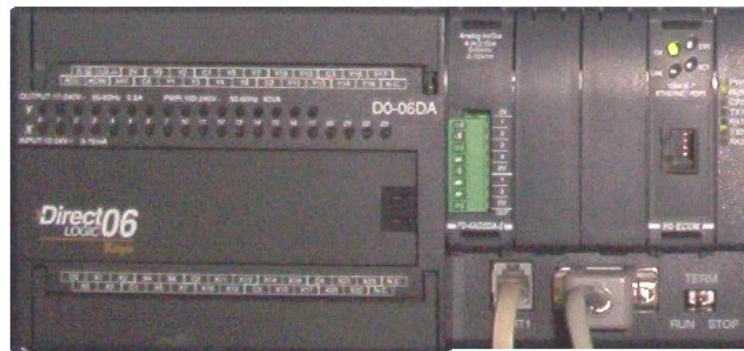


Figura 8.7: Controlador Lógico Programable

8.5. Esquemas de la implementación

8.5.1. Tablero

El tablero de control, se muestra en la figura 8.8, en este se puede ver claramente en la parte superior izquierda el conversor RS232-RS485; en la parte superior derecha la fuente de 24V, el breaker general de protección y el cableado de potencia; en la parte inferior

izquierda el PLC; y en la parte inferior derecha las tarjetas de adquisición de datos.



Figura 8.8: Vista interna del tablero de control

Las tarjetas de adquisición de datos son de izquierda a derecha: la M7017, la cual se dejó configurada para entradas de corriente y recibe las señales de los sensores de presión; la M7018, la cual se dejó configurada para entradas de termocuplas y recibe las señales de éstas; la I7019 para corriente, no tiene nada conectado a ésta y se instaló para una expansión futura del sistema de instrumentación; la I7024 se configuró como salidas de corriente para el manejo de las válvulas proporcionales que están en proceso de instalación.

8.5.2. Evaporadores

El sistema de evaporadores real se muestra en la figura 8.9. Se puede observar al lado inferior izquierdo un costado del tablero de control (color azul).



Figura 8.9: Tren de evaporadores

Un esquema para detallar el sitio en el cual fueron instalados los sensores, se muestra en la figura 8.10

de adquisición de datos; los conversores se utilizan para cambiar el protocolo, pues ni el computador, ni el PLC (por el puerto en que nos comunicamos) soportan RS-485, así que se cambian de RS-232 a RS-485 y se logra una única red de equipos, adicional a esto la ventaja de distancia de RS-485 brinda la posibilidad que de una manera sencilla se logre pasar este proceso un centro de control que se diseñe a futuro para todo el laboratorio.

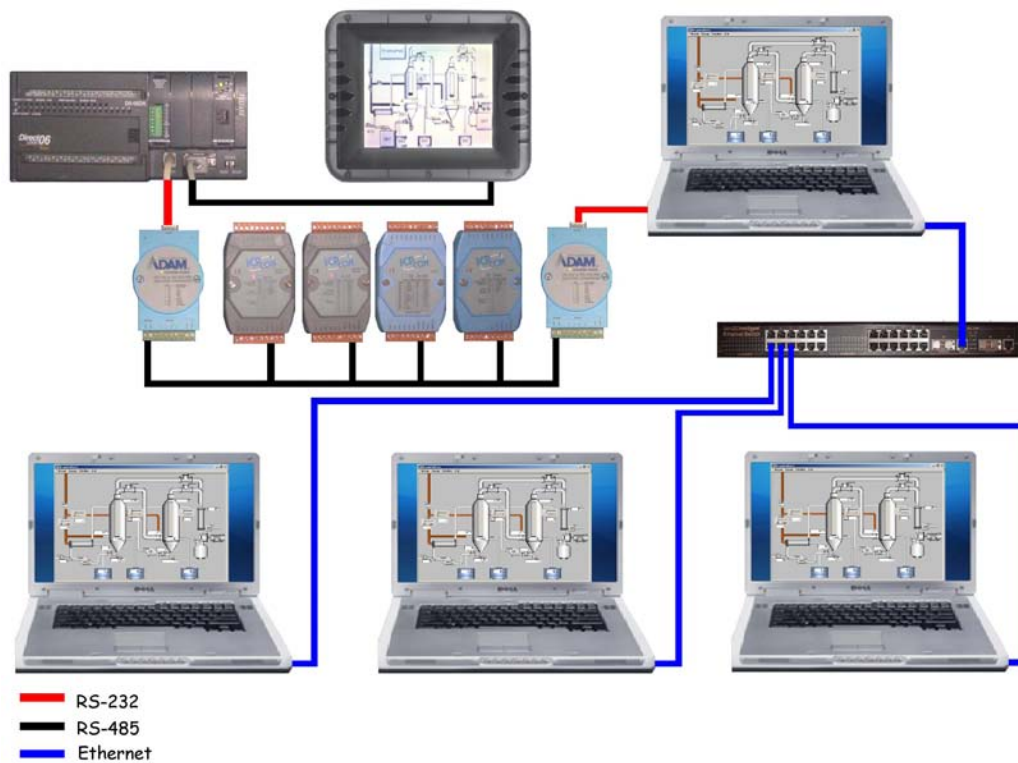


Figura 8.11: Red de equipos

Capítulo 9

Sistema SCADA implementado

Luego de haber diseñado los controladores, además de instrumentar el sistema, se desarrolló un sistema de supervisión, el cual además de monitorear las variables de proceso en el computador, permite interactuar con el touchscreen.

9.1. Software de Conectividad DDE

Dos aplicaciones Windows, que soporten DDE (acrónimo de Intercambio Dinámico de Datos) pueden establecer una comunicación, mediante la conectividad DDE. La aplicación que inicia la conversación se llama cliente o destino y la que responde servidor o fuente. Así, DDE es un estándar de conectividad Windows que permite a dos aplicaciones mantener una conversación durante la cual, la información es intercambiada automáticamente [Cerqueira y Poppi , 1996].

9.1.1. Parámetros de la Conectividad DDE

Una conexión DDE consta de ciertos parámetros, los cuales se deben manejar de forma adecuada para poder establecer la conexión:

- *Aplicación*: Es el nombre de la aplicación origen. En este caso es DDE_Koyo.
- *Tema o tópico*: Nombre que se ha dado al software para identificarlo. Para esta aplicación es PLC.
- *Elemento o ítem*: Nombre de la variable (entrada, salida, memoria) que se quiere leer del PLC.

9.1.2. Software DDE Desarrollado

La pantalla de visualización del software de conectividad DDE, se muestra en la figura 9.1. Se puede observar la aplicación, tópico e ítems a los cuales se puede acceder, como también la selección de los mismos.

9.1.2.1. Variables que puede leer el DDE

El software de conectividad desarrollado puede leer:

- *Entradas Digitales*: Puede leer las entradas digitales que posee el PLC, tanto en bits como en bytes, esto para dar cierta versatilidad al usuario final.
- *Salidas Digitales*: Observa el estado actual de las salidas digitales que posee el PLC, en bits y en bytes.



Figura 9.1: Ventana de Visualización del DDE

- *Memorias internas:* Se pueden leer una a una las memorias del PLC desde la V2000 hasta la V2037 (la numeración de estas se encuentra en formato octal), esto con el fin de supervisar entradas y salidas análogas que se configuren en estas al igual que otras variables de proceso que se guarden en las mismas.

9.1.3. Software DDE Modificado

Para hacer el sistema más flexible y facilitar la implementación del sistema SCADA para todo el laboratorio, se modificó el DDE, de modo que trabajara bajo RS-485 a 2 hilos, y que además de interactuar con el PLC, lo hiciera con las tarjetas de adquisición de datos (DAQPRO) encargadas de la captura de las señales entregadas por los sensores. Adicional a esto se organizó de modo que pudiera además de leer, forzar algunas variables del PLC y así hacer el control y la supervisión desde el computador. La pantalla de visualización de este software, se muestra en la figura 9.2. Igual que en el anterior, se puede observar la aplicación, tópico e items a los cuales se puede acceder, como también la selección de los

mismos.



Figura 9.2: Ventana de Visualización del DDE Modificado

9.1.3.1. Variables que puede leer y/o forzar el DDE

El software de conectividad desarrollado puede leer:

- *Entradas Digitales:* Puede leer las entradas digitales que posee el PLC, tanto en bits como en bytes, esto para dar cierta versatilidad al usuario final.
- *Salidas Digitales:* Observa el estado actual de las salidas digitales que posee el PLC, en bits y en bytes.
- *Memorias internas:* Se pueden leer una a una las memorias del PLC desde la V2000 hasta la V2047 (la numeración de estas se encuentra en formato octal), esto con el

fin de supervisar entradas y salidas análogas que se configuren en estas al igual que otras variables de proceso que se guarden en las mismas.

- *Entradas Análogas:* Observa las 8 entradas análogas de cada una de las tarjetas DAQPRO que poseen este tipo de entradas (M7017, M7018, I7019).

Además puede forzar:

- *Salidas Digitales:* Forza el estado actual de las salidas digitales que posee el PLC, cuando se le muestra un cambio en bits o en bytes.
- *Banderas:* Forza el estado actual de las banderas, esto con el fin de poder forzar variables desde el computador y el touchscreen.
- *Memorias internas:* Se pueden forzar una a una las memorias del PLC desde la V2010 hasta la V2047 (la numeración de estas se encuentra en formato octal), con el fin de dar al PLC el valor que tienen las tarjetas DAQPRO y así visualizarlo en el touchscreen.
- *Salidas Análogas:* Forza las salidas análogas de la tarjeta DAQPRO (I7024) a la cual se pretenden conectar las válvulas del sistema.

Cabe anotar, que la tarjeta de entradas y salidas análogas del PLC son forzadas y leídas con las memorias internas del mismo.

9.1.4. Software DDE con acceso remoto

Para hacer el sistema aún más flexible y facilitar la implementación del sistema SCADA para todo el laboratorio, además de permitir una supervisión del estado del proceso desde cualquier lugar dentro de la LAN (Local Area Network) interna de la Universidad, se modificó nuevamente el DDE, permitiendo la conexión a este de tantos clientes como la memoria del computador permita, éste se conecta bajo ethernet y TCP/IP. La pantalla de visualización del software servidor y cliente, se muestran en las figuras 9.3 y 9.4 respectivamente. Igual que en el anterior, se puede observar la aplicación, tópico e ítems a los cuales se puede acceder, como también la selección de los mismos.

Las variables a leer y forzar por el servidor son las mismas que las del DDE de la sección 9.1.3.1, mientras el cliente permite solo la lectura de esas variables.

Para la comunicación TCP/IP (acceso remoto), es solo hacer que la IP remota, y el puerto remoto del DDE cliente, coincidan con la IP local y el puerto local del DDE servidor, luego se hace la conexión y el cliente se encarga de leer automáticamente los datos del servidor.

9.2. Software SCADA

Diferentes imágenes que muestran el sistema de supervisión, son mostradas en las figuras 9.5, 9.6, 9.7, 9.8, y 9.9. El SCADA para el DDE modificado y DDE con acceso remoto, se encarga de tomar la información tomada por los sensores y entregada a la tarjeta de adquisición de datos, y luego forzar estos datos en el PLC, para que así se puedan

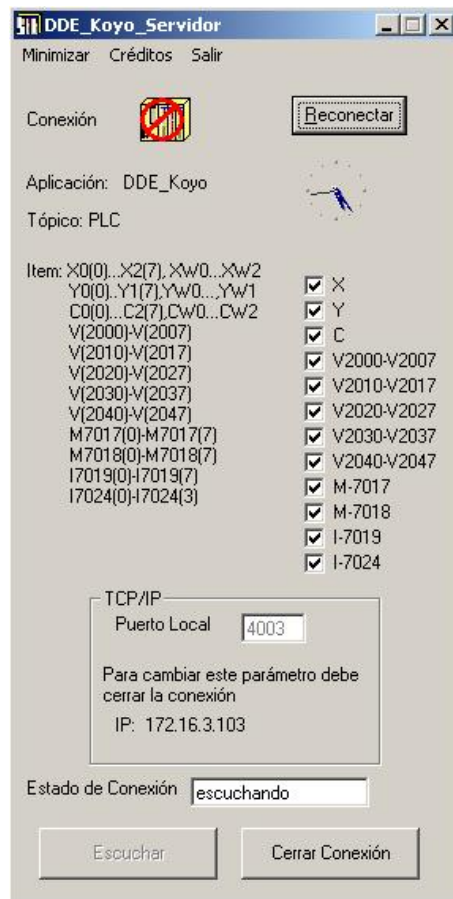


Figura 9.3: Ventana de Visualización del DDE servidor con acceso remoto

visualizar en el touch-screen. El SCADA para el DDE cliente se encarga de tomar los datos que el DDE servidor transfirió al primero, que son en sí las señales entregadas por los sensores.

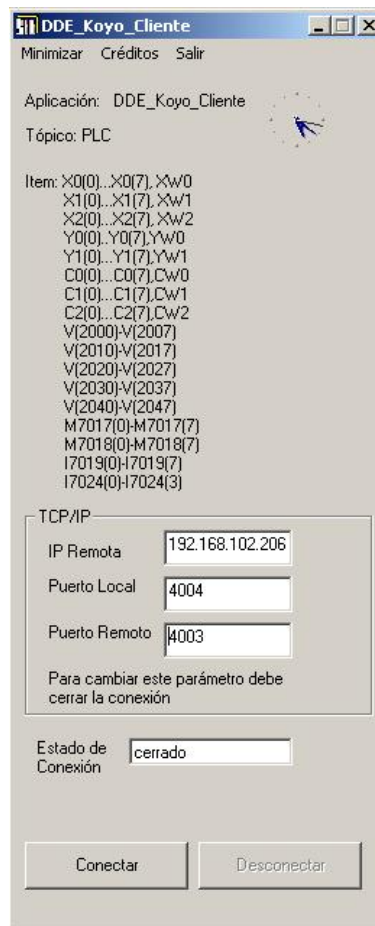


Figura 9.4: Ventana de Visualización del DDE cliente para acceso remoto



Figura 9.5: Pantalla de presentación del sistema de supervisión

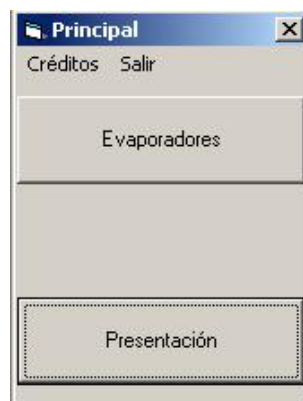


Figura 9.6: Pantalla de selección del sistema de supervisión

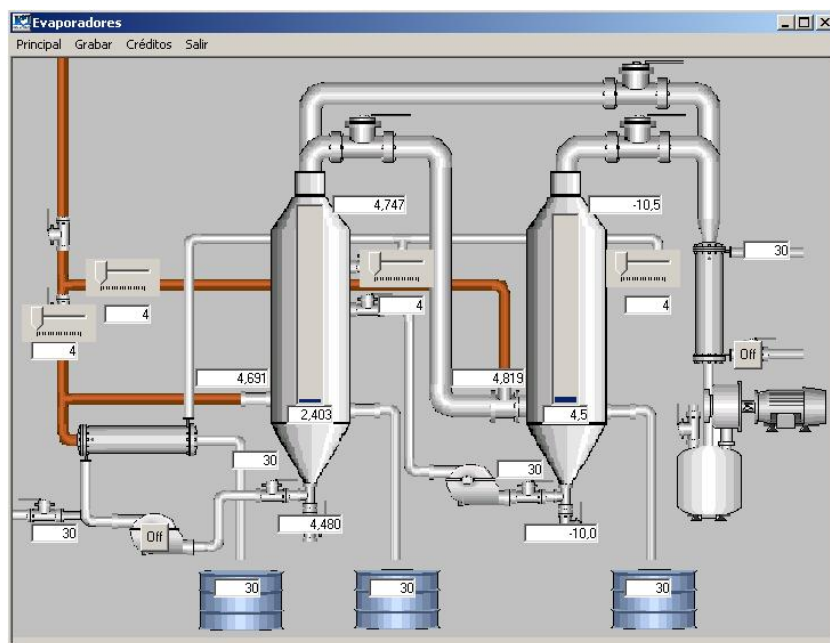


Figura 9.7: Sistema de supervisión de los evaporadores

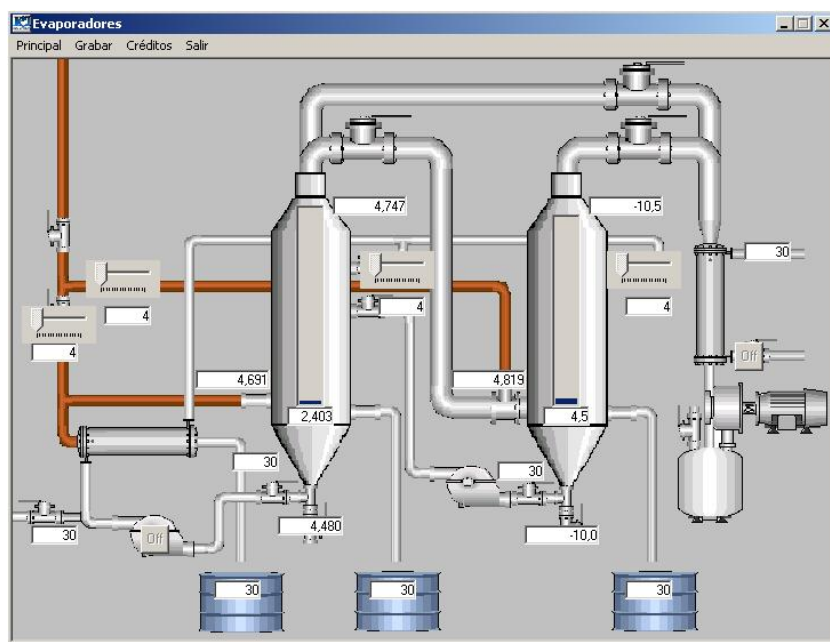


Figura 9.8: Sistema de supervisión para el cliente

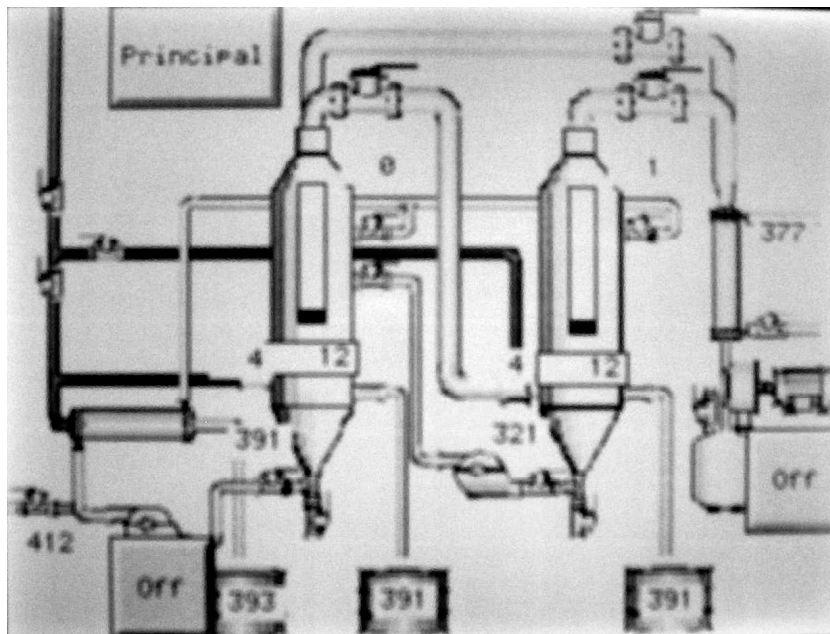


Figura 9.9: Sistema de supervisión visto en el touch screen

Conclusiones

En la tesis se ha mostrado el diseño de diversos controladores, así como el comportamiento de estos con la variación de parámetros internos y externos. El sistema controlado funciona adecuadamente en un rango de operación determinado, dependiendo de cada uno de los controladores. Esto debido a que son técnicas de aproximación lineales y por lo cual responden adecuadamente en el rango en el cual el sistema es lineal para el controlador.

El control por estabilización robusta a diferencia de los demás controladores tuvo un desempeño adecuado para cualquier valor dentro de los rangos de operación establecido, esto debido a que la estructura del controlador hace que funcione bajo dinámicas no estimadas y plantas perturbadas, por lo cual estas variaciones se encuentran dentro del rango de plantas para las cuales el controlador funciona.

Los fenómenos no lineales (Bifurcaciones y caos), encontrados para el sistema controlado con la variación en presión, temperatura o área, oscilan en un rango muy pequeño para la mayoría de los casos, por tal razón no influyen en el desempeño del sistema de manera notable, por tanto los controladores diseñados pueden ser utilizados para el control del proceso.

El sistema controlado a baja presión no regula para algunos controladores (difuso, PI), debido a que el sistema se puede operar tanto a sobrepresión como a vacío, es recomendable utilizar otros controladores que no sean sensibles al cambio de la presión.

El control por estabilización robusta, al presentar un desempeño favorable para los rangos de operación propuestos, sería el recomendado para una futura implementación.

El sistema de instrumentación implementado permite observar de manera más verídica los estados actuales del proceso, además permite a los estudiantes preocuparse más en el análisis de datos que en la toma de los mismos y la precisión adicional alcanzada hace posible una corroboración de los datos teóricos con respecto a los experimentales.

La supervisión del proceso de manera local y remota, permite un control más adecuado de la utilización del equipo, también prevenir accidentes, además de ser una herramienta con la cual se puede proporcionar una asesoría al medio.

Trabajo Futuro

Inicialmente es importante instalar electroválvulas, para el control del vapor vivo de caldera y el fluido de alimentación del proceso y así poder implementar el control del mismo de manera confiable.

En la parte de modelado, algo necesario es analizar la dinámica de la caldera y de la bomba de vacío, las cuales no se tuvieron en cuenta en los modelos.

Además de esto, es importante instalar sensores de flujo de vapor producido y concentración del producto, para no depender en tanta medida de un modelo matemático en el control del proceso, y adicional a esto poder validar los resultados del modelado, análisis y control del sistema.

Luego, se debe realizar un análisis de estabilidad del proceso en forma más detallada y en el cual se calculen matemáticamente los puntos de equilibrio del sistema y su comportamiento. Además demostrar matemáticamente y comprobar experimentalmente los fenómenos encontrados.

El estudio hecho en la presente tesis se enfocó en soluciones azucaradas, se hace ne-

cesario el análisis del sistema para diversas soluciones y ver la viabilidad de un sistema de control generalizado para cualquier tipo de solución.

En teoría de control existen infinidad de estrategias de control, por lo cual sería útil buscar diferentes estrategias de control a las propuestas y contrarrestar resultados, para ver si se puede encontrar una estrategia de control más robusta y/o que presente un mejor desempeño para el sistema.

También se deben buscar técnicas de control MIMO para controlar simultáneamente todas las variables de estado del proceso, buscando un desempeño adecuado en el mismo.

Algo importante por hacer es crear un centro de control para el laboratorio, en el cual se haga un SCADA que sirva para monitorear todos los procesos y desde un solo punto detener cualquier posible daño para los equipos.

Otro desarrollo a realizar es una aplicación de supervisión orientada a web, con el fin de tener un acceso remoto al proceso no solo en la LAN interna, sino desde cualquier lugar, y así la universidad pueda prestar servicio de asesoría y apoyo a diferentes empresas y universidades, además de optimizar el funcionamiento del equipo y recuperar la inversión hecha en el mismo.

Bibliografía

Atecna, *Centros de Control y Supervisión* <http://www.atecna.cl/ccs.htm>.

André, H. y Ritter, R, *Dynamic Response of a Double Effect Evaporator*, Universidad de Alberta, 1968. 8

André, H. y Ritter, R, *Evaporator Control System Design*, Universidad de Alberta, 1970. 8

Agudelo Valencia, Rafael Nikolay *Modelamiento del Tren de Evaporadores de Plantas de Procesos Productivos*, Universidad Nacional de Colombia, Trabajo de grado, 2000. 13

Angulo, F., Londoño A., Marín, J., y Mesa F. *Automatización y Control de Equipos en los Laboratorios de Procesos Productivos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales*, Proyecto de Investigación, 2004. 13

Benne, M., Grondin-Perez, B., Chariat, J. y Hervé, P., *Artificial Neural Networks for Modelling and Predictive Control of an Industrial Evaporation Process*, Universidad de La Reunion , 2000. 9

Burdett, J., y Holland, C., *Dynamics of a Multiple-Effect Evaporator System*, Universidad Texas A&M, 1971. 8

- B & B Electronics, *RS-422 and RS-485 Application Note*, 1997. 112
- Cesca, *Modelo Dinámico de la Evaporación Múltiple*. 23
- Cerqueira, E., y Poppi, R., *Using dynamic data exchange- to exchange information between Visual Basic and Matlab*, 1996. 123
- Chen C., *Analog and Digital Control System Design*. 32
- Dierks, *PLC-automata: a new class of implementable real-time automata*, Universidad de Oldenburg, 2001 12
- Doyle, J., Francis, B., y Tannenbaum, A., *Feedback Control Theory*, 1990. 52
- Echeverri, V. *Control de los Evaporadores de los Laboratorios de Procesos Productivos de la Universidad Nacional de Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Maestría, 2005. 6, 7, 13, 14, 22, 31
- Flammini, A., Ferrari, P., Sisinni, E., Marioli, D., y Taroni, A. *Sensor interfaces: from field-bus to Ethernet and Internet* 11
- García, M. *Herramienta para la Planificación de Procesos en Sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos*, Universidad Politécnica de Madrid, 1995.
- Gerksic, S., Dolanc, G., Vrancic D., Kocijan, J., Strmcnik, S., Blazic, S., Skrjanc, I., Marinsek, Z., Bozicek, M, Stathakie, A., King, R., Hadjiskif, M.,s y Boshnakov, K. *Advanced control algorithms embedded in a programmable logic controller*, 2005 12
- Hong, X. y Jianhua, W. *Using standard components in automation industry: A study on OPC Specification*, Universidad Xian JiaoTong, 2005 12

- Kam, K. y Tadé, M., *Simulated Nonlinear Control Studies of Five-Effect Evaporator Models*, 2000. 10
- Kam, K., Tadé, M., Rangaiah, G., y Tian, Y., *Strategies for Enhancing Geometric Nonlinear Control of an Industrial Evaporator System*, 2001. 10
- Keenan, J., *Steam tables : thermodynamic properties of water including vapor, liquid, and solid phases*, John Wiley, 1969. 24
- Kilian, *Modern Control Technology: Components and Systems*, 2 ed, 2001. 32, 33
- Lewin, R., Faigon, M., Fuchs, A., y Semiat, R. *Modelling and control of two-phase systems*, European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 1992.
- Liu, M., Xue, J., y Qiang, A., *Chaotic forecasting of time series of heat-transfer coefficient for an evaporator with a two-phase flow*, Universidad Tianjin, 2004. 10
- Lozano, J., Elustondo, M., y Romagnoli, J., *Control Studies in an Industrial Apple Juice Evaporator*, 1984. 9
- McCabe, W., Smith, J. y Harriot, P. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, Universidad Saga, Japón, 1999. 16
- Nanayakkaraa, V., Ikegamib, Y., y Uehara, H., *Evolutionary Design of Dynamic Neural Networks for Evaporator Control*, Universidad Saga, Japón, 2001. 11
- Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderna*, 3 ed., 1998. 33
- Onken, U., y Hanns-Ingolf, P. *Fundamentals of chemical engineering*, Hanns Hofmann, 1990. 22
- Porras, A. y Montanero, A., *Manual del Ingeniero Químico*, McGraw-Hill , 1992. 24

- Perry, R., Green, D., y Maloney, J., *Autómatas Programables*, McGraw-Hill , 1 ed. , 1990. 114
- Qiu, B. y Gooi, H. *Web-Based SCADA Display Systems (WSDS) for Access via Internet*, 2000. 12
- Rangaiah, G., Saha, P., y Tadé, M. *Nonlinear model predictive control of an industrial four-stage evaporator system via simulation*, Universidad de Singapur, Universidad de Tecnología de Curtin, 2001. 11
- Reid, R., Prausnitz, J., y Poling, B., *The Properties of gases and liquids*, McGraw-Hill, 1987. 20, 23, 24, 26
- Reklaitis, G., y Schneider., D. *Balances de Materia y Energía*, Nueva Editorial Interamericana, 1986. 21
- Riu, P., Rosell, J., y Ramos, J., *Sistemas de Instrumentación*, 1995. 109
- Russell, N., Bakker, H., y Chaplin, R. *A Comparison of Dynamic Models for an Evaporation Process*, Universidad de Massey, Nueva Zelanda, 2000. 9
- Russell, N., Bakker, H., y Chaplin, R. *Modular neural network modelling for long-range prediction of an evaporator*, Universidad de Massey, Nueva Zelanda, 2000. 9
- Slotine y Li *Applied Nonlinear Control*, Instituto Tecnológico de Massachusetts, 1991. 91
- Smith, C., y Corripio, A., *Control Automático de Procesos: Teoría y Práctica*, Limusa S. A. 2000.

- Su, C., Lu, C., y Hsiao T *Simulation Study of Internet Based Inter Control Center Data Exchange for Complete Network Modeling* 12
- Thomas, S., Kumar, P., y Chandna V. *Design, Development, and Commissioning of a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Laboratory for Research and Training*, 2004. 13
- Villegas, S. *Diseño e implementación de un acceso remoto para el PLC GE Fanuc Series 90 Micro*, Universidad Nacional, Trabajo de grado, 2005.
- Wang, H., Tsai J., y Chen, Y., *A cubic equation of state for vapor-liquid equilibrium calculations of nonpolar and polar fluids*, *Fluid Phase Equilibria*, 2004. 24, 25, 26
- Wu, G., y Stiel, L., *A Generalized Equation of State for the Thermodynamic Properties of Polar Fluids*, *AIChE Journal*, 1985 24