

01170



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

COMPARACION DE LAS TECNICAS DE DETECCION
DE FALLAS MEDIANTE LOS METODOS:
MODELOS FISICOS,
OBSERVADORES
E IDENTIFICACION DE PARAMETROS SOBRE
EL SISTEMA DE TRES TANQUES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERIA

(E L E C T R I C A)

P R E S E N T A :

LIC. EN FISICA JULIO CESAR CRUZ LEON

CIUDAD UNIVERSITARIA

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

En la industria son ampliamente utilizados los sistemas de transporte de líquido, en los cuales se presentan generalmente las siguientes fallas: error en sensores y bombas, fugas y obstrucciones en tuberías. Al revisar la literatura sobre la detección de fallas para estos sistemas, se encontraron varias técnicas para ello. En este trabajo se revisan y comparan tres de las técnicas existentes en la detección de fallas. Las técnicas se basan en modelos físicos, observadores e identificación de parámetros. Estos métodos fueron aplicados a la supervisión para el sistema de tres tanques de laboratorio.

Como primer paso en este trabajo se propone un modelo matemático formado por cinco ecuaciones diferenciales las cuales describen la evolución del sistema de tres tanques. Este modelo se utilizó en los tres métodos seleccionados, procediendo de la siguiente manera

El método basado en modelos físicos, consiste en ir comparando las salidas del proceso con las del modelo; la diferencia entre estos genera el residuo. Este indica la presencia de una falla en caso de sobrepasar una tolerancia ya establecida. A partir de la evolución del residuo se forma la huella de la falla, que es empleada para la detección, localización y cuantificación de la falla.

Para el esquema basado en observadores, en primer lugar se linealiza el modelo. Hecho esto se plantea un banco de tres observadores de orden reducido, uno por cada salida. Cada observador estima una salida a partir de las otras. De existir una diferencia entre la salida estimada y el valor medido del proceso mayor a una tolerancia, se tiene la presencia de una falla. De la evolución de la diferencia antes mencionada se logra la detección de fallas.

Por último se revisó el método de identificación de parámetros. En este se identifican los parámetros de un modelo del proceso. Estos parámetros están relacionados con los parámetros físicos del mismo. Cambios en los parámetros identificados permiten determinar cambios en los parámetros físicos y por lo tanto fallas. En el caso del sistema de tres tanques fue posible identificar el área y el coeficiente de fricción del ducto que une a dos tanques. De la evolución de los parámetros identificados ante cada falla, se hizo posible la localización y la detección de las mismas.

Cada uno de los esquemas de detección de fallas estudiado fue probado ante las diferentes fallas que permite el sistema. De los resultados obtenidos se formuló una lógica para la localización, cuantificación y detección de fallas en tiempo real.

Una vez implementada esta lógica en cada uno de los tres esquemas, estos se probaron ante

- Error en sensores
- Velocidad de respuesta
- Falsas alarmas

Los resultados obtenidos muestran que los tres esquemas presentan un desempeño aceptable, observando que cuando se tienen fallas en los sensores, el método basado en identificación de parámetros resultó ser el más exacto, así como el de observadores el que menos falsa alarma presenta. Mas al hacer la evaluación global, el método basado en modelo físico resultó ser el más eficiente.

Fis Julio César Cruz León

ÍNDICE

Resumen.....	1
Índice	II
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
Introducción.....	2
2.- TÉCNICAS DE DINÁMICA DE SISTEMAS EMPLEADAS EN LA DETECCIÓN DE FALLAS.....	4
2.1 Modelos físicos.....	5
2.2 Observadores de sistemas lineales	6
2.2.1 Observabilidad.....	6
2.2.2 Observador de estado de orden completo	7
2.2.3 Observadores de estado de orden reducido	8
2.3 Identificación de parámetros	12
2.3.2 Excitación persistente.....	15
3.- EL SISTEMA DE TRES TANQUES.....	17
3.1 Sistema de tres tanques.....	18
3.2 Modelo dinámico del sistema	19
3.3 Descripción del equipo de laboratorio	25
Tabla 3.1.- Especificaciones del sistema de tres tanques	27
4.- DETECCIÓN DE FALLAS PARA EL SISTEMA DE TRES TANQUES.....	30
4.1 Detección de fallas por el método de modelos físicos	31
4.1.2 Lógica para la detección de fallas usando modelos físicos	42
4.1.3 Cuantificación de los errores en sensores	45
4.2 Detección de fallas empleando observadores	47
4.2.2 Lógica para la detección de fallas por observadores	56
4.2.3 Cuantificación del error en sensores	58
	60

4.3 Identificación de parámetros en la detección de fallas	69
4.3.2 Lógica para el método de identificación de parámetros	72
4.3.3 Cuantificación de fallas en sensores	74
5 - COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE DETECCIÓN DE FALLAS	75
5.1 Escenario	76
5.1.2 Diagrama de flujo del programa base	78
5.2 Pruebas llevadas a cabo para comparar el comportamiento de los tres esquemas	82
5.3 Análisis e interpretación de los resultados	86
6 - CONCLUSIONES	87
6.1 Conclusiones	88
6.2 Perspectivas	89
AGRADECIMIENTOS	91
BIBLIOGRAFÍA	

**El presente trabajo fue presentado en la segunda conferencia de Ingeniería Eléctrica -
Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV - IPN efectuado en la ciudad de
México en septiembre de 1996**

CAPÍTULO

I

INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de marcar los lineamientos de la presente tesis, en este capítulo se plantean las ideas que la motivaron, así como los elementos de los que se partió, con el propósito de establecer las metas que se persiguen. Por último, se presenta como está organizado este trabajo.

INTRODUCCIÓN

Día a día crece la necesidad de aplicar sistemas de regulación automáticos para satisfacer las más estrictas condiciones de producción y/o funcionamiento de los procesos. Esto trae consigo un aumento en el uso de esquemas de supervisión que garanticen la confiabilidad del sistema de control. Los esquemas de detección, localización y cuantificación de fallas permiten tomar medidas correctivas adecuadas, y a tiempo, reduciendo el efecto de las fallas en la producción.

Son varios los trabajos hechos en torno al tema de detección, localización y cuantificación de fallas, destacando los de Isermann (1983), P. Frank (1987, 1988), Patton (1987, 1988), Clark (1975) y otros, en los cuales se presentan diferentes metodologías para la supervisión de procesos. Isermann ha desarrollado esquemas de supervisión que emplean la identificación de parámetros, mientras que Clark y Frank hacen uso de observadores. Cada uno ha mostrado las ventajas de los esquemas desarrollados por ellos, sin embargo, no se tiene una comparación de éstos; por lo que en esta tesis se estudia cada uno de estos métodos con el objeto de conocer sus fundamentos y compararlos en condiciones similares con el propósito de señalar sus ventajas y desventajas. Como resultado de esta comparación se tendrán alternativas para la detección de fallas en sistemas de transporte de líquidos, sin que para ello se tengan que introducir nuevas herramientas de la Dinámica de Sistemas empleadas en la detección de fallas, pues se evaluará el desempeño de las ya conocidas. Las referencias históricas sobre los métodos de supervisión fueron tomadas de dos artículos, uno de Paul Frank publicado en 1990 [20] y el otro de Rolf Isermann editado en 1993 [25].

Trabajos más recientes sobre este tema son los publicados en 1995 por Milchika [31] y G. B. Giannakis [22]. En el primero se hace uso de observadores, mientras en el segundo se emplean técnicas de identificación. Así mismo, se encontraron otros métodos de igual importancia para la supervisión de procesos como podría ser el uso de redes neuronales propuesto por Sorsa [34] en 1993, el empleo de control predictivo como lo propone S. Vares en 1993 [35], el uso del espacio de paridad desarrollado por J. Francois [18] en 1994 y el uso de propiedades estructurales del control óptimo propuesto por J. Quian [33].

Los autores antes mencionados proponen varias alternativas para la detección de fallas, al no poder abarcar todas, únicamente se seleccionaron casos particulares de éstas fundados en

- el empleo de modelos físicos
- el uso de observadores
- la aplicación de identificación de parámetros

Estos fueron seleccionados pues como se mostró en párrafos anteriores, existe una pugna entre quien propone el método de identificación de parámetros, y los que proponen el empleo de observadores; por lo que de una manera imparcial se confrontan estos métodos en las mismas circunstancias para determinar, por lo menos en un sistema hidráulico, cual es el más eficiente. Por otra parte, al realizar la investigación inicial y

conocer el método de modelos físicos, se tuvo la curiosidad de vislumbrar el alcance de este método, por lo que se pensó en compararlo junto con los otros, que en principio ya han sido probados.

Para la comparación de los algoritmos de detección de fallas que se propuso realizar en esta tesis se seleccionó un sistema piloto de tres tanques. En este es posible introducir fallas sin dañarlo. El sistema utilizado es un ejemplo típico de los equipos usados en el transporte de líquidos y gases.

El trabajo aquí presentado está organizado de la siguiente manera

Dentro de capítulo 2, se presentan algunas herramientas de Dinámica de Sistemas que son los fundamentos teóricos en los que se basan los métodos de detección de fallas estudiados en esta tesis. Lo anterior facilitará la descripción y aplicación de las técnicas de detección de fallas estudiadas.

En el capítulo 3 se describe el sistema de tres tanques construido por la compañía alemana Amira. Primeramente se describe los elementos que componen el sistema. Aplicando los principios de conservación presentados en el capítulo 2, se desarrolla el modelo dinámico del proceso. Finalmente se dan las especificaciones técnicas del equipo sobre el cual se realiza la parte experimental de esta tesis.

Dentro del capítulo 4, se muestran los diferentes esquemas de detección de fallas aplicados al sistema de tres tanques. Se realizan pruebas de estos esquemas tanto en simulación, como en el proceso del laboratorio. De los resultados de estas pruebas se desarrolla una serie de reglas que hace posible la localización de fallas, a la que se llama lógica con la que es posible supervisar al sistema en tiempo real.

En el capítulo 5 se compara el desempeño de los esquemas de detección de fallas estudiados, considerando los siguientes criterios

- cuantificación de errores en sensores
- velocidad de respuesta
- falsa Alarma

Estos criterios se seleccionaron en virtud de que un esquema de supervisión debe ser confiable, es decir no debe de presentar falsas alarmas, indicar la presencia de cualquier falla en un tiempo adecuado, indicar la causa de la falla y magnitud de ésta. De no ser así, no se podrán tomar las medidas correctivas adecuadas. La velocidad de detección es un parámetro que permite evaluar la sensibilidad de los esquemas comparados. La robustez de los esquemas se encuentra relacionada con la ausencia de falsas alarmas.

Por último, dentro del capítulo 6 se dan las conclusiones finales de este trabajo, así como los trabajos a futuro que de él se pueden desprender.

CAPÍTULO

2

TÉCNICAS DE DINÁMICA DE SISTEMAS EMPLEADAS EN LA DETECCIÓN DE FALLAS

Como primer paso se propone estudiar varios conceptos propios de la dinámica de sistemas que serán empleados en la detección de fallas, por lo que se han de definir estos conceptos, con lo cual hará más fluido el resto de la presentación. Es de mencionar, que como en este trabajo se pretende estudiar tres técnicas de detección de fallas muy distintas entre si, además de formular el modelo del sistema de tres tanques, este capítulo se divide en tres secciones bastante independientes como a continuación se describe

Como el primer método a tratar se basa en modelos físicos, en el inciso 2.1 se dan los principios utilizados en el modelado de procesos. Se presentan los principios de conservación, a partir de los cuales se desarrolla el modelo del sistema de tres tanques que se usa en este trabajo de tesis.

A continuación, dentro del inciso 2.2, se revisan los observadores lineales comenzando con el concepto de observabilidad y posteriormente se define el observador de orden completo. Ya con él es posible exponer al observador de orden reducido que será aplicado en la detección de fallas.

Por último, en el inciso 2.3 se tratan los conceptos de identificación de parámetros así como el algoritmo gradiente. Esto se hace tomando como ejemplo a un sistema dinámico continuo, ya que en la literatura se hace énfasis en el empleo de esta clase de modelos en la detección de fallas.

2.1 MODELOS FÍSICOS

Los modelos dinámicos son un nombre genérico dado a los modelos matemáticos de sistemas formados por un conjunto de ecuaciones diferenciales o ecuaciones de transformación. Estos son utilizados en el análisis teórico del comportamiento de sistemas y su subsecuente reconfiguración. Existen diversas técnicas para realizar un modelo, pero al no ser la meta del presente trabajo, sólo se muestran las que se emplean para modelar al sistema de tres tanques.

Para los fines de esta tesis se desarrollo un modelo, el cual se obtuvo a partir de dos principios de conservación, que a continuación se enlistan.

Ecuación de continuidad

Uno de los principios básicos de la Física es el de conservación de materia, el cual es empleado para establecer la ecuación de continuidad. Esta ecuación al ser aplicada sobre un fluido de densidad ρ en un referencial xyz se enuncia como

La acumulación de materia para un flujo de densidad ρ es igual a la velocidad de entrada de materia menos la velocidad de salida de materia, su expresión matemática es

$$\frac{d\rho}{dt} = - \left(\frac{\partial \rho v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho v}{\partial z} \right) \quad 2.1$$

siendo ρ la densidad del liquido
 v la velocidad del liquido
 x, y, z el espacio euclidiano

En esta ecuación se describe la variación de la energía para un punto fijo, como consecuencia de las variaciones del vector de velocidad másica ρv .

Ecuación de movimiento

Otro principio empleado en la obtención del modelo fue la segunda ley de Newton o ecuación de movimiento, la cual es enunciada de la siguiente manera.

La suma de las fuerzas aplicadas sobre un sistema, es igual al cambio de su impetu (el producto de la masa por la velocidad del sistema) con respecto al tiempo.

Para un flujo de densidad ρ y volumen V esta ecuación se escribe como

$$\frac{d(\rho V v)}{dt} = \sum F \quad 2.2$$

2.2 OBSERVADORES EN SISTEMAS LINEALES

Otra herramienta de la Dinámica de Sistemas son los observadores de estado. Los observadores fueron desarrollados debido al problema presentado en Control Automático al requerir variables que no eran medibles evitando la diferenciación de una variable, ya que se introduce ruido al sistema. Aunque lo deseable es que todas las variables sean observables, esto no siempre es posible por lo que antes de desarrollar un observador se ha de verificar si esto se puede hacer, lo que se logra mediante el concepto de observabilidad que a continuación se describe.

2.2.1 OBSERVABILIDAD

Considere el sistema no forzado

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.3}$$

donde

x es el vector de estados de dimensión n
 y es el vector de salidas de dimensión p
 A y C son matrices constantes de dimensiones apropiadas

Se dice que el sistema es completamente observable, si cada estado $x(t_0)$ se puede determinar a partir de la observación de $y(t)$ en un intervalo de tiempo finito $t_0 < t < t_1$. El hecho que un proceso sea observable implica que cada transición del estado afecta eventualmente cada elemento del vector de salida. Estos resultados no cambian si se usa un sistema forzado de la forma

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.4}$$

El vector de salida para sistemas lineales no forzado es

$$y(t) = Ce^{At}x(0)\tag{2.5}$$

Recordando que

$$e^{At} = \sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k(t)A^k\tag{2.6}$$

la ecuación 2.5 se puede escribir como

$$y(t) = \sum_{k=0}^{k-1} \alpha_k(t) CA^k x(0) \quad 2.7$$

Si el sistema es completamente observable dada la salida $y(t)$ a lo largo de un intervalo de tiempo $0 < t < t_i$; $x(0)$ está unívocamente definido por la ecuación 2.7, lo que requiere que el rango de la matriz de $n \times n$

$$C = \begin{bmatrix} C \\ C'A \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad 2.8$$

sea n .

2.2.2 OBSERVADOR DE ESTADO DE ORDEN COMPLETO

Sea el sistema forzado

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad 2.9$$

Con u el vector de excitación a que es sometido el sistema, y B una matriz de dimensiones adecuadas. Supóngase que el sistema es completamente observable. El estado x del sistema se puede aproximar por \bar{x} obtenido a partir del sistema dinámico

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + Bu + K_c(y - C\bar{x}) \quad 2.10$$

que es el observador de estado. El observador tiene como entradas a "y" y a "u" así como, a \bar{x} de salida. El tercer término del segundo miembro de la ecuación 2.10, es un factor de corrección en el cual se incluye la diferencia entre la salida medida y así como la salida estimada $C\bar{x}$; siendo K_c una constante de peso, cuyo efecto es modificar la dinámica del observador. Si las matrices A , B y C son diferentes a las del proceso, el término de corrección ayuda a reducir el efecto de esta discrepancia

2.2.3 OBSERVADORES DE ORDEN REDUCIDO

Hay veces que no es necesario identificar todo el vector de estado, lo que se realiza mediante los observadores de orden reducido como a continuación se describe. Considere el sistema

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

Se desea observar parte del estado "x" (que no es medible) a partir de las entradas y salidas del sistema. Sea x_b la parte del vector de estado que se desea estimar, y x_a el remanente del vector de estado (medibles). Sea además A_{ij} la submatriz de A que es afectado por los estados j al evaluar los estados i, así mismo, la matriz B_i la parte de la matriz B usada por los estados i. Con la anterior nomenclatura la ecuación del sistema toma la forma

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} u \quad 2.11$$

y la ecuación de salida es

$$y = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} \quad 2.12$$

De la ecuación 2.11 se tiene

$$\dot{x}_a = A_{aa}x_a + A_{ab}x_b + B_a u \quad 2.13$$

de donde

$$\dot{x}_a - A_{aa}x_a - B_a u = A_{ab}x_b \quad 2.14$$

Los términos del lado izquierdo se pueden medir, por lo que esta ecuación actuará como ecuación de salida. Por otro lado, también de la ecuación 2.11 se obtiene

$$\dot{x}_b = A_{ba}x_a + A_{bb}x_b + B_b u \quad 2.15$$

Esta ecuación describe la dinámica de la parte que se desea estimar. A partir de las ecuaciones 2.14 y 2.15 se forma el sistema dinámico

$$\dot{x}_b = A_{ba}x_a + A_{bb}x_b + B_b u \quad 2.16$$

$$w = A_{ab}x_b \quad 2.17$$

Siendo

$$w = \dot{x}_a - A_{aa}x_a - B_a u$$

Haciendo una analogía con el sistema antes visto de la forma (2.9)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

es posible sustituir en el observador de orden completo (ecuación 2.10)

$$\dot{\bar{x}} = (A - K_c C)\bar{x} + Bu - K_c y \quad 2.18$$

llegando a

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_b &= (A_{bb} - K_c A_{ab})\bar{x}_b + A_{ba}x_a + B_b u + \\ &+ K_c (x_a - A_{aa}x_a - B_a u) \end{aligned} \quad 2.19$$

siendo K_c la matriz de ganancia del observador.

En esta ecuación se ve que es necesario conocer la derivada del vector x_a lo que se ha de evitar, ya que no es medible, pues del sistema únicamente se conocen las salidas, y aunque es posible que en algún sistema se cuente como salida alguna derivada de otra salida, esto no siempre ocurre. Por lo que para evitar la derivada del vector x_a , se hace en primer lugar $x_a = y$, y se escribe a la ecuación 2.19 en la forma

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\bar{x}_b - K_c x_a) &= (A_{bb} - K_c A_{ab})\bar{x}_b + \\ &+ (A_{ba} - K_c A_{aa})y + (B_b - K_c B_a)u. \\ \frac{d}{dt}(\bar{x}_b - K_c x_a) &= (A_{bb} - K_c A_{ab})(\bar{x}_b - K_c y) + \\ &+ [(A_{bb} - K_c A_{ab})K_c + A_{ba} - K_c A_{aa}]y + \\ &+ (B_b - K_c B_a)u \end{aligned} \quad 2.20$$

Definiendo la variable v como

$$\begin{aligned} x_b - K_c y &= x_b - k_c x_a = v & 2.21 \\ \bar{x}_b - K_c y &= \bar{x}_b - k_c x_a = \bar{v} \end{aligned}$$

se tiene

$$\begin{aligned} \dot{\bar{v}} &= (A_{bb} - K_c A_{ab})\bar{v} + [(A_{bb} - K_c A_{ab})K_c + A_{ba} - K_c A_{aa}]y + & 2.22 \\ &+ (B_b - K_c B_a)u \end{aligned}$$

La ecuación 2.22 es el observador de v . A partir de v se puede obtener \bar{x}_b como se muestra a continuación :

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_a \\ \bar{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ k_c y + \bar{v} \end{bmatrix} \quad 2.23$$

El proceso anterior, se resume en la figura 2.1 en la que se muestra como primero se realiza el observador, encontrándose así el valor de \bar{v} , para después realizar una transformación para hallar \bar{x}_b , logrando así la meta deseada.

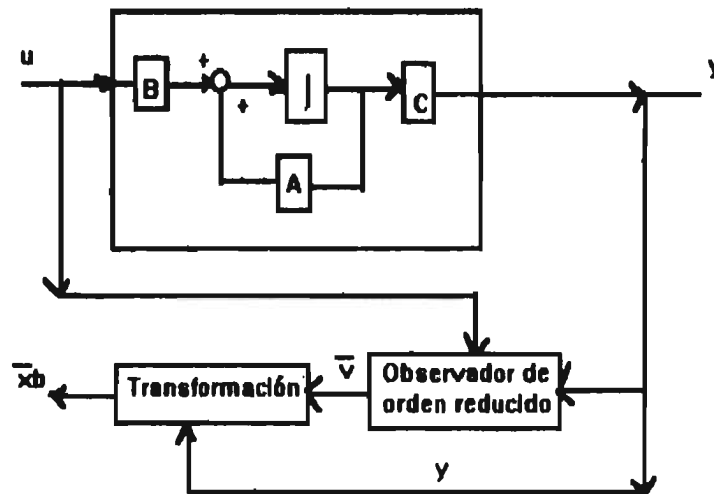


Figura 2.1 proceso y observador de orden reducido

Se continúa deduciendo la ecuación de error del estimador, para lo cual se ha de modificar la ecuación 2.19, a partir de la ecuación 2.14, obteniendo

$$\dot{\bar{x}}_b = (A_{bb} - K_c A_{ab})\bar{x}_b + A_{ba} x_a + B_b u + K_c A_{ab} x_b \quad 2.24$$

asi como a la ecuación 2.16

$$\dot{x}_b = A_{ba}x_a + A_{bb}x_b + B_b u \quad 2.25$$

Por medio de la diferencia de las ecuaciones anteriores, se encuentra que el error del observador es

$$\begin{aligned} \dot{x}_b - \dot{\bar{x}}_b &= (A_{bb} - K_c A_{ab})(x_b - \bar{x}_b) \\ e &= x_b - \bar{x}_b = v - \bar{v} \end{aligned} \quad 2.26$$

Al cual también es posible darle la forma

$$\dot{e} = (A_{bb} - K_c A_{ab})e \quad 2.27$$

Este error presenta las siguientes propiedades:

-- El desempeño dinámico del vector error está determinado por los valores propios de $A_{bb} - K_c A_{ab}$. Si esta matriz es estable el error converge a cero para cualquier valor inicial de $x(t_0)$.

-- Eligiendo de manera adecuada los valores propios de $A_{bb} - K_c A_{ab}$ el desempeño dinámico del vector error será asintóticamente estable y adecuadamente rápido.

2.3 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Otra herramienta que se puede usar para caracterizar la dinámica de un sistema es la identificación de parámetros, la cual tiene como objetivo obtener el valor estimado de los parámetros de un modelo del proceso, a partir del conocimiento de las señales de entrada a que es expuesto el proceso, así como las señales de salida que se obtengan.

Considere para esto el modelo dinámico de un sistema escalar continuo descrito por

$$y = -ay + ku \quad 2.28$$

Este modelo se propone primeramente por su sencillez, ya que el modelo multivariable del sistema de los tres tanques, con que se desea trabajar, se pudo escribir como un conjunto de modelos monovariantes.

A partir de la entrada u y salida y se estiman los valores a y k que mejor aproximen al comportamiento dinámico presentado por el sistema, pero como se observa en este modelo se requiere de la derivada de y , cuyo valor no se dispone, y calcularlo introduciría errores en la identificación de parámetros.

Para salvar la limitación antes mencionada, se toma la transformada de Laplace del modelo (2.28) con condiciones iniciales igual a cero, y se dividen ambos miembros por $s+\lambda$

$$\frac{(s+a)}{s+\lambda} y = \frac{k}{s+\lambda} u \quad 2.29$$

donde λ es un parámetro de diseño al cual será posible darle un valor para lograr el mejor desempeño para la estimación.

Sumando y restando $\lambda/(s+\lambda)$ al primer miembro de la ecuación 2.29 es posible escribirla como:

$$\hat{y} = \frac{\lambda - a}{s + \lambda} y + \frac{k}{s + \lambda} u \quad 2.30$$

Donde se busca que la \hat{y} sea muy parecida al valor de la salida y del proceso

A continuación se definen las funciones

$$W = \frac{1}{s + \lambda} y \quad 2.31$$

y

$$V = \frac{1}{s + \lambda} r \quad 2.32$$

para que la ecuación 2.30 adquiera la forma

$$\hat{y} = (\lambda - a)W + kV \quad 2.33$$

Como se observa, W y V son la solución de ecuaciones diferenciales de primer orden. Con esta transformación se tiene una expresión que involucra los dos coeficientes que se desea identificar, sin requerir del conocimiento de la derivada de y . Por otro lado, la ecuación 2.33 puede escribirse de la forma:

$$\hat{y} = \theta^t \phi \quad 2.34$$

donde θ es el vector de parámetros a identificar

$$\theta = \begin{bmatrix} \lambda - a \\ k \end{bmatrix} \quad 2.35$$

y el vector ϕ , conocido como regresor.

$$\phi = \begin{bmatrix} W \\ V \end{bmatrix} \quad 2.36$$

donde

$$\begin{aligned} \phi &\in \mathfrak{R}^2 \\ \theta &\in \mathfrak{R}^2 \end{aligned} \quad 2.37$$

Ya resuelto el problema que se presenta al no tener la derivada de las señales de salida, se está en posición de estimar los parámetros del modelo

Un modo para lograr esto, es emplear el algoritmo gradiente, que se define como

$$\dot{\theta} = -\gamma \phi \varepsilon \quad 2.38$$

donde γ una constante positiva. En esta técnica se busca minimizar el cuadrado del error, el cual se define como

$$\varepsilon = y - \hat{y} \quad 2.39$$

Estabilidad del algoritmo gradiente

La estabilidad del algoritmo gradiente se muestra a partir del siguiente teorema que se aceptará sin su demostración [13]; además de algunos otros conceptos como la norma de espacios l_p que también se definen a continuación.

Teorema de Liapunov

Sea el sistema

$$\dot{x} = f(t, x(t)) \quad \forall t > 0$$

se dice que tiene un punto de equilibrio x_0

$$\dot{x} = f(x_0) = 0 \quad \forall t \geq 0 \quad 2.40$$

estable si existe una función localmente positiva definida $v: \mathcal{R} \times \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ tal que

$$\dot{v}(t, x) \leq 0 \quad \forall t_0, \quad \forall x \in \mathcal{R}^n$$

donde a v se le denomina función de Liapunov

Otro concepto que es necesario introducir es el de norma de espacios l_p , la cual se define para una función $u(t) \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{R}^n$ como

$$\|u\|_p = \left(\int_0^{\infty} |u(r)|^p dr \right)^{1/p} \quad 2.41$$

para $p \in [1, \infty)$. Un caso especial es la norma l infinito, la cual se define como

$$\|u(t)\|_{\infty} = \sup_{t>0} |u(t)| \quad 2.42$$

También se hace necesario un corolario, que parte del lema de Barbalat, el cual se da a continuación

Corolario: Si la función g así como su derivada tienen norma l infinito y g posee además norma l_p para cualquier $p \in [1, \infty)$, entonces $g(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$.

Es posible hallar más información sobre este corolario y el teorema de Barbalat en el libro de Sastry y Bodson [11]

Ya con lo anterior es posible demostrar que el algoritmo gradiente es estable, para lo cual se ha de proceder Con el siguiente teorema

Teorema Considere la ecuación del error, junto con el algoritmo gradiente. y sea ϕ continua a trozos entonces

$$\begin{aligned} e &\in L_2 \\ \kappa &\in L_\infty \end{aligned}$$

Demostración: La ecuación que describe el error del algoritmo gradiente es

$$\dot{\kappa}(t) = -\gamma\phi^t(t)\phi(t)\kappa(t) \quad 2.43$$

Se propone la función de Liapunov

$$v = \kappa^t(t)\kappa(t) \quad 2.44$$

Derivando con respecto al tiempo

$$\dot{v} = -2g(\kappa^t\phi)^2 = -2ge^2 \quad 2.45$$

Lo que significa $0 \leq v(t) \leq v(0)$ para todo t así que $v, \kappa \in L_\infty$. Así mismo, dado que v es positiva y monótonamente decreciente, y el límite $v(\infty)$ está bien definido, se tiene

$$-\frac{1}{2g} \int_0^\infty \dot{v} = \int_0^\infty e^2 dt < \infty \quad 2.46$$

lo cual significa que $e \in L_2$

2.3.2 EXCITACIÓN PERSISTENTE

Una vez que se ha tratado la estabilidad del error e , se ha de tratar la convergencia del parámetro θ a su valor nominal θ^* , lo que está relacionado con la convergencia del parámetro del error e a cero. Si se propone a este error como $e = \theta^t\phi - \theta^{*t}\phi = (\theta^t - \theta^{*t})\phi = \kappa^t\phi$, la ecuación diferencial que describe la evolución de éste es

$$\dot{\kappa}(t) = -\gamma\phi^t(t)\phi(t)\kappa(t) \quad 2.47$$

la convergencia del parámetro θ a su valor nominal θ^* , se demostrara a partir de la siguiente definición.

Definición El vector de entradas $\phi(t): \mathcal{R}_+ \rightarrow \mathcal{R}^{2n}$ es excitación persistente si existen a_1, a_2 $\delta > 0$ tal que

$$a_2 I \geq \int_t^{t+\delta} \phi(\tau) \phi(\tau)' d\tau \geq a_1 I \quad 2.48$$

Si bien la matriz $\phi(\tau)\phi'(\tau)$ es singular para toda τ , la condición de excitación persistente requiere que $\phi(\tau)$ rote suficientemente en el espacio que la integral de la matriz $\phi(\tau)\phi'(\tau)$ es uniformemente definida positiva sobre cualquier intervalo de longitud δ .

Para entender esta definición, se ha de considerar a la ecuación escalar de excitación persistente

$$a_2 \geq \int_t^{t+\delta} \left| \phi'(\tau) \right|^2 d\tau \geq a_1 \quad 2.49$$

como una condición de la energía de $\phi(\tau)$ en todas direcciones; estableciendo con ello el siguiente teorema de convergencia

Teorema Sea $\phi: \mathcal{R}_+ \rightarrow \mathcal{R}^{2n}$ una función continua a trozos, si ϕ es una excitación persistente, entonces la ecuación 2.47- es globalmente y exponencialmente estable.

Ya que se tiene bien definido y caracterizado al algoritmo gradiente, por medio del cual se identifica al vector θ , es posible conocer los valores de a y k con sólo aplicar la formula 2.38, obteniendo:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda - a \\ k \end{bmatrix} \quad 2.50$$

Se puede prestar una confusión al calcular el valor de a , ya que está en función de θ_1 y λ pero sólo hay que recordar que el parámetro λ fue seleccionado de tal suerte que contribuyera con convergencia de θ_1 por lo que es conocido.

CAPÍTULO

3

EL SISTEMA DE TRES TANQUES

En este capítulo se describe el sistema de tres tanques, construido por la compañía Alemana **Amira**, el cual fue usado en la etapa experimental de esta tesis, en la cual se compara el desempeño de las distintas técnicas de detección de fallas.

El sistema formado por tres tanques en línea interconectados, es un proceso no lineal fuertemente acoplado. Este sistema es un buen ejemplo de los utilizados en el transporte y almacenamientos de líquidos, tales como petróleo, gasolina o agua.

El equipo de laboratorio con el cual se trabajó permite en forma fácil y sencilla introducir distintas fallas tales como: errores en los sensores, actuadores, tapones y fugas, problemas típicos de los procesos de almacenamiento y conducción de líquidos.

Este capítulo está organizado de la siguiente forma. En la sección 3.1 se expone en que consiste el proceso de tres tanques de un modo general. Dentro de la sección 3.2 se presenta el modelo dinámico del sistema. Por último, en la sección 3.3 se describe el equipo con el cual se realizaron las pruebas en tiempo real; mostrándose sus características físicas y eléctricas.

3.1 SISTEMA DE TRES TANQUES

El sistema considerado en este trabajo está formado por tres tanques en línea interconectados (Fig. 3.1). Las dimensiones de los tanques son similares, así como las de las tuberías que los unen como se muestra en la tabla 3.1 al final de este capítulo.

A continuación se describe el sistema. El tanque en el extremo izquierdo tiene como entradas el gasto $Q_0(t)$ que proporciona una bomba y el gasto $Q_2(t)$ que proviene de la comunicación entre el tanque 1 y 3. Por otro lado presenta una válvula que permite representar fugas (flujo $Q_1(t)$). El tanque 3 ubicado en el centro, tiene como entradas el gasto $Q_2(t)$ que proviene de la interconexión entre los tanques 3 y 1 y el gasto $Q_4(t)$ que es producido por la diferencia de niveles entre los tanques 2 y 3. Al igual que el tanque anterior se tiene una válvula que permite representar fugas (flujo $Q_3(t)$). El tanque 2 localizado en la extrema derecha, tiene como entradas el gasto $Q_4(t)$ que es función de la interconexión de los tanques 3 y 2, así como el gasto $Q_6(t)$ (Salida a la cisterna) y el gasto $Q_7(t)$ que es suministrado por una bomba. El tanque 2 cuenta con una válvula ubicada en la parte inferior que permite simular fugas (flujo $Q_5(t)$). Los tubos que unen los tanques se encuentran en la parte inferior de estos.

En el sistema de tres tanques se toman como salidas medibles el nivel del agua en cada uno de ellos. Las entradas del sistema son los gastos proporcionados por dos bombas que alimentan los tanques 1 y 2.

La principal aplicación de este equipo es la simulación de sistemas de transporte de líquido, los cuales son muy empleados en la industria, así como sistemas de riego, distribución de agua potable urbano y otros.

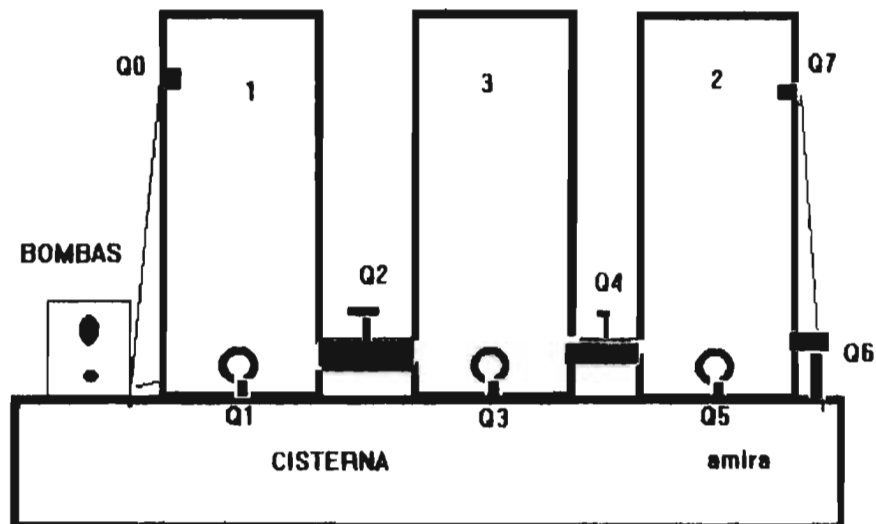


Figura 3.1 Esquema del sistema de tres tanques.

3.2 MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA

El modelo matemático del sistema se obtiene a partir de los principios de balance de continuidad y momento. Con el fin de mostrar claramente la deducción matemática del modelo, ésta se realiza por subsistemas y al final se presentara el modelo completo.

Se comienza por el sistema más simple, un tanque.

Modelo dinámico de un tanque

Este modelo se obtiene aplicando el principio de continuidad. Este principio de conservación indica que el flujo que entra al sistema menos el que sale es igual a la variación en el tiempo de la masa que se tiene en el tanque.

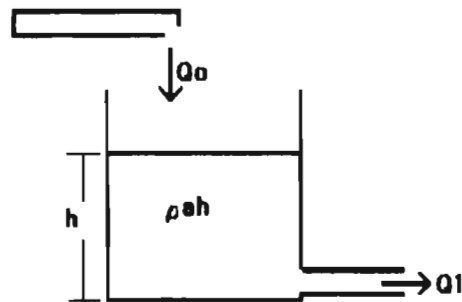


Figura 3.2 Tanque con una entrada y una salida.

La masa en el tanque es

$$m = \rho a h \quad 3.1$$

donde

ρ = densidad del líquido
 a = área del tanque
 h = nivel del líquido en el tanque

La ecuación que describe al balance de masa está dada por

$$\rho (Q_0 - Q_1) = \frac{d \rho a h}{dt} \quad 3.2$$

Si ρ y a son constantes es posible obtener

$$\frac{Q_0 - Q_1}{a} = \frac{dh}{dt} \quad 3.3$$

con

$Q_0(t)$ el gasto que entra al sistema

$Q_1(t)$ el gasto que sale del sistema

Una vez que se tiene el modelo del tanque, se completa éste incorporando un tubo en el gasto que sale del tanque.

Modelo de un sistema tanque -tubo con fricción

El modelo del sistema tanque-tubo con fricción, que se muestra en la figura 3.3, se obtiene tomando el modelo para el tanque dado por la ecuación 3.3, mostrado anteriormente y haciendo un balance de cantidad de movimiento en la tubería

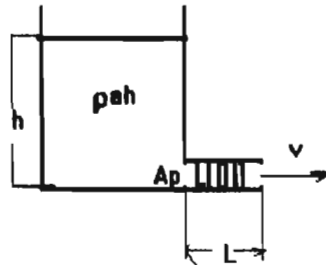


Figura 3.3 Tanque-tubo con fricción.

Considérese el sistema descrito en la figura 3.3, donde a es el área del tanque; A_p es el área transversal del tubo, L es la longitud de éste, ρ es la densidad del líquido, h es el nivel del líquido en el tanque y v su velocidad del líquido en la tubería.

El principio de cantidad de movimiento es

$$\frac{d}{dt} mv = \sum_i F_i \quad 3.4$$

La masa en el tubo está determinada por

$$m = \rho A_p L \quad 3.5$$

y su cantidad de movimiento es

$$m v = \rho A_p L v \quad 3.6$$

La fuerza que actúa sobre el sistema es debida a la presión hidrostática. Esta presión en la parte inferior del tanque está definida por

$$\frac{\text{peso del líquido}}{\text{área}} = \frac{\rho A_p h g}{A_p} = \rho h g \quad 3.7$$

Por el principio de Arquímedes la presión es la misma en todos los puntos [7], es decir, la fuerza sobre el tubo es igual a la presión del líquido en el tanque por el área del tubo, que se denota por

$$\text{Fuerza sobre el tubo} = \rho h g A_p \quad 3.8$$

Otra fuerza que interviene en el sistema es la fuerza de fricción, debida al roce del fluido con las paredes del ducto. Esta se define como

$$\text{Fuerza de fricción} = K_f L v^2 \quad 3.9$$

siendo K_f el coeficiente de fricción descrito por

$$K_f = K A_p^3 \quad 3.10$$

Reemplazando en la ecuación 3.4 las ecuaciones 3.6, 3.8 y 3.11 se llega a la ecuación de cantidad de movimiento buscada

$$\frac{d \rho A_p L v}{dt} = A_p h \rho g - K A_p^3 L v^2 \quad 3.11$$

Como siguiente paso obtendremos el modelo de dos tanques unidos por una tubería con fricción.

Modelo de dos sistemas tanque - tubo con fricción (Figura 3.4)

Ya que se tiene por un lado al modelo de cada uno de los tanques a partir del principio de continuidad, y por otro al modelo del tubo con fricción; es posible modelar a un sistema formado por dos tanques unidos mediante un tubo, a partir del principio de conservación de cantidad de movimiento. obteniendo

$$\frac{d \rho A_p L v}{dt} = A_p (h_1 - h_2) \rho g - K A_p^3 L v^2 \quad 3.13$$

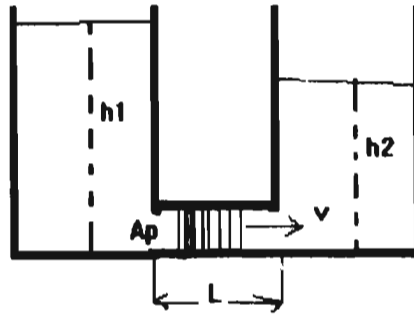


Figura 3.4 Dos tanque interconectados por un tubo con fricción.

En la ecuación 3.14 es necesario tener en cuenta que la fuerza de fricción se opone al movimiento del agua. Si consideramos que el movimiento del agua está determinado por la diferencia de alturas, se propone reescribir el modelo como

$$\frac{d\rho A_p L v}{dt} = \text{sign}(h_1 - h_2) (A_p |h_1 - h_2| \rho g - K A_p^3 L v^2) \quad 3.14$$

donde sign es la función signo que se define de la siguiente forma

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad 3.15$$

Si A_p , ρ y L son constantes y $Q = v A_p$, la ecuación anterior se escribe como

$$\frac{dQ}{dt} = \text{sign}(h_1 - h_2) \left(\frac{A_p |h_1 - h_2|}{L} g - \frac{K A_p Q^2}{\rho} \right) \quad 3.16$$

Por ultimo se presenta el modelo usado para representar las fugas en los tanques.

Modelo para representar fugas (Figura 3.5)

Si se define la resistencia de un elemento fisico como el cambio en el potencial requerido para producir un cambio unitario en la corriente, razón de flujo o velocidad como

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Cambio de potencial}}{\text{Cambio de corriente, razon de flujo}}$$

La resistencia que presenta un flujo al atravesar un tubo, puede definirse como el cambio en la altura diferencial necesaria para causar un cambio unitario en la razón de flujo

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Cambio de altura diferencial}}{\text{Cambio de razón de flujo}}$$

Para el caso de una fuga, de la definición anterior, es posible determinar su flujo mediante la ecuación siguiente

$$Q = \frac{h}{R} \quad 3.17$$

donde

Q = es el flujo en la fuga

Δh = un cambio pequeño en el nivel del líquido en el tanque

R = Resistencia de oposición al flujo

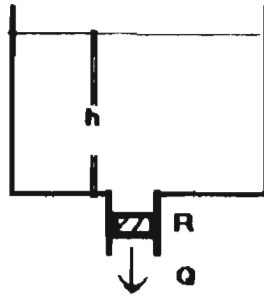


Figura 3.5 Tanque con escape

De los modelos de los subsistemas anteriores se obtiene el modelo completo del sistema.

Modelo del sistema de tres tanques

Para representar el comportamiento de los gastos $Q_1(t)$, $Q_3(t)$, $Q_5(t)$, $Q_6(t)$ se toma el modelo para fugas, los gastos $Q_2(t)$ y $Q_4(t)$ se determinan a partir de los balances de cantidad de movimiento en los tubos.

El modelo obtenido con las consideraciones anteriores es:

Modelo del Sistema Completo

Tanque 1

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_0 - Q_1 - Q_2}{a} \quad 3.18$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \text{sig}(h_1 - h_3) \left\{ \frac{A_{p2} \text{abs}(h_1 - h_3) g}{L} - \frac{KA_{p2} Q_2^2}{\rho} \right\} \quad 3.19$$

$$Q_1 = \frac{\Delta h_1}{R_1} \quad 3.20$$

Tanque 3

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{Q_2 - Q_3 - Q_4}{a} \quad 3.21$$

$$\frac{dQ_4}{dt} = \text{sig}(h_3 - h_2) \left\{ \frac{A_{p4} \text{abs}(h_3 - h_2) g}{L} - \frac{KA_{p4} Q_4^2}{\rho} \right\} \quad 3.22$$

$$Q_3 = \frac{\Delta h_3}{R_3} \quad 3.23$$

Tanque 2

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Q_4 - Q_5 - Q_6 + Q_7}{a} \quad 3.24$$

$$Q_5 = \frac{\Delta h_2}{R_5} \quad 3.25$$

$$Q_6 = \frac{\Delta h_2}{R_7} \quad 3.26$$

El modelo obtenido esta formado por cinco ecuaciones diferenciales no lineales y cuatro ecuaciones algebraicas

3.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE LABORATORIO

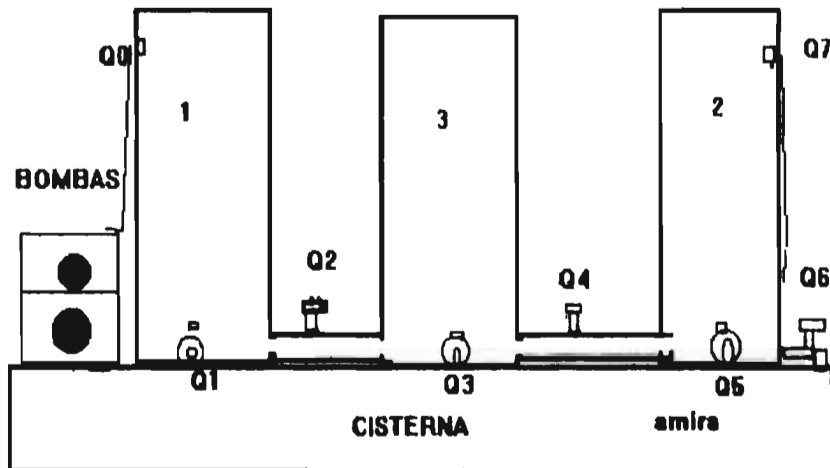


Figura. 3.6 Esquema del sistema de tres tanques

Se cuenta con un prototipo de laboratorio del sistema de tres tanques. Este equipo presenta gran versatilidad, ya que es posible introducir fallas en sensores, actuadores y fugas sin dañarlo.

El equipo de laboratorio está formado de tres cilindros de acrílico, alineados sobre una base del mismo material que funciona como cisterna, en la que se almacena el agua que se usa. Como se aprecia en Figura 3.6, el agua es introducida a los tanques de los extremos, mediante dos bombas, mientras que el de en medio es llenado por ductos que lo unen a los otros dos tanques.

Los actuadores del sistema, (las bombas), los sensores de nivel y las celdas de presión están conectados a una consola de operación (Fig. 3.7) la cual está conectada a su vez a la computadora donde se hace la operación automática. En la consola se tienen diferentes funciones:

*La primera de ellas es la posibilidad de operar las bombas del sistema en forma manual, contando cada una con un interruptor que permite prender y apagar la bomba, así como un potenciómetro para variar el flujo desde 0 a 100%.

*La segunda función es la de operar en forma automática (por medio de la computadora) el equipo. Esto permite leer en el monitor las alturas de los tanques así como la posibilidad de enviarle la cantidad de flujo requerido para cada bomba. Aquí es posible

introducir variaciones en las bombas; para esto, en la consola se cuenta con potenciómetros que permiten hacer variar los datos que envía la computadora respecto del valor deseado (valores que varían de 0 a 100%, del valor deseado). Adicionalmente se cuenta con un potenciómetro para cada sensor, que permite introducir arbitrariamente un error al medir los niveles de cada tanque. *Normalmente estos potenciómetros se hallan al 100% y al disminuir este valor es cuando se introduce el error.*

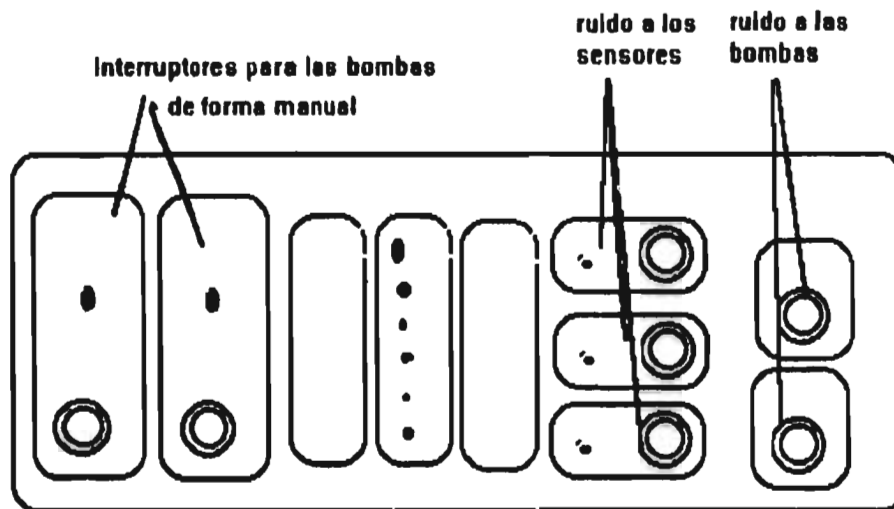


Figura 3.7 Frente de la consola que funciona como interface entre el sistema de tres tanques y la computadora.

Como parte integral del equipo, se cuenta con la tarjeta de convertidores DAC 6214, por medio de la cual se conecta la consola con una computadora PC 486 DX a 33 Mhz. Con esta tarjeta se leen los valores de los sensores y se envían los valores que se aplican a las bombas. Las características técnicas de esta tarjeta aparecen en la Tabla 3.1

Los programas que se encargan de manejar la operación de la tarjeta de adquisición de datos fueron desarrollados en C++. Estos programas se hicieron a partir de manejadores proporcionados por el fabricante y acondicionados al caso que nos ocupa en este trabajo.

TABLA 3.1
ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE TRES TANQUES
 1/3

TANQUES			
		VALOR	UNIDAD
LARGO		1260	mm
ANCHO		325	mm
ALTO		830	mm
PESO		34	Kg
CISTERNA			
LARGO		1200	mm
ANCHO		325	mm
ALTO		160	mm
CAPACIDAD		45	L
DIAMETRO E TANQUES			
DIAMETRO INTERIOR		150	mm
ALTURA TOTAL		140	mm
NIVEL MAX DE LIQUIDO		670	mm
CAPACIDAD	9.7	630	mm
LLAVES			
UNIONES	0.5		cm2
SOBREFLUJO NOMINAL	0.5		cm2
LEAKAGE OPENINGS	0.8		cm2
BOMBAS			
BOMBAS DE DIAFRAGMA DE TRES SECCIONES CON MOTOR DE DC			
RANGO DE VOLTAJE		12	V
RANGO DE CORRIENTE	1.5		A
FLUJO		6	Vm2
PRESION	1.3		bar
PESO	1.47		kg
LARGO		250	mm
ANCHO		160	mm

TABLA 3.1
 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE TRES TANQUES
 2/3

SENSORES					
TRANSDUCTOR	MIN	TYP	MAX	UNIDAD	
PIEZOELECTRICO DIFERENCIAL DE PRESION					
VOLTAJE DE SOPORTE		7		16 V	
CALIBRACION DE OFFSET	.95		1.105	V	
SALIDA A TODA PRESION	5.9		6.61	V	
LINEALIDAD		0.5	1.5	%FSO	
CAMBIOS DE TEMPERATURA		0.5		1 %FSO	
HISTERISIS		.2		%FSO	
TIEMPO DE RESPUESTA		.1		MS	
ENTRADAS					
	VALOR	UNIDAD			
VOLTAJE A	0...+12	V			
VOLTAJE A SENSORES		8 V			
SALIDAS					
NIVEL DEL LIQUIDO PAR BOMBAS SENSORES					
NIVEL DE	VOLTAJE	1...+5.6	V		
RANGO DE ALTURA		0...63	cm		
RESOLUCION			73 mV/cm		
CONSOLA					
DIMENSIONES					
LARGO		365 mm			
ANCHO		317 mm			

TABLA 3.1
 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE TRES TANQUES
 3/3

ALTO		147	mm	
PESO		7.5	Kg	
ENTRADAS				
VOLTAJE DE ENTRADA		220	V	
FRECUENCIA		50	Hz	*
POTENCIA		150	W	
FUSIBLE PRINCIPAL	0.6		A	
COMPONENTES DE LA TAJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS				
2 CANALES INTERNOS ANALÓGICOS PARA OBSERVAR LAS SALIDAS ANALÓGICAS				
1 CONVERTIDOR DE 12 BIT A/D AD7575				
2 SALIDAS BIPOLARES D/A				
2 CONVERTIDORES DE 12 BIT DA7542				
1 ENCODER DE 6 ENTRADAS BIPOLARES A/D PARA MEDIR POSICIÓN Y ROTACION				
12 BIT PARA SEÑALES DE ENCODER HCTL200				
4 ENTRADAS COMPATIBLES TTL				
4 SALIDAS COMPATIBLES TTL				
*	Ya que en el país se usan 60 Hz, se mando a traer un convertidor, con el objeto de mantener al equipo en optimas condiciones			

CAPÍTULO

4

DETECCIÓN DE FALLAS PARA EL SISTEMA DE TRES TANQUES

Una vez descrito el sistema de tres tanques y las técnicas de dinámica de sistemas en que se fundamentan los esquemas de detección de fallas, se da a continuación la descripción y aplicación de éstas sobre este sistema.

Las pruebas se hicieron tanto experimentalmente, usando el sistema físico de los tres tanques, así como en simulación, empleando al programa Simnon del cual se hablara más adelante con detalle

En este capítulo se estudian en 4.1 el método de detección de fallas basado en modelos físicos, en el apartado 4.2, el basado en observadores y en 4.3 el de identificación de parámetros.

Para cada uno de los métodos seleccionados, se describe su fundamento, se establece la manera en que fueron aplicados, dando algunas gráficas de los resultados; tanto en simulación como experimentalmente. Para cada uno de los tres esquemas, se resumen los resultados en tablas, y a partir de estas tablas se establece una lógica para supervisar al proceso en tiempo real por cada esquema. También se describe la metodología empleada para cuantificar las fallas en sensores, ya que ésta es la única que se puede medir.

4.1 DETECCIÓN DE FALLAS POR EL MÉTODO DE MODELOS FÍSICOS

En esta sección se describe el uso de modelos físicos en la detección de fallas para el sistema de tres tanques.

Este método consiste en comparar la salida medida del proceso (h_{real}), y la del modelo matemático (h_{modelo}). A la diferencia entre estas dos se le conoce como residuo. El residuo indica un cambio en la dinámica del proceso.

Como los modelos matemáticos son tan sólo una aproximación del comportamiento real de proceso, siempre habrá una discrepancia entre ambos, si ésta es mayor a una tolerancia previamente establecida se dirá que el sistema presenta una falla

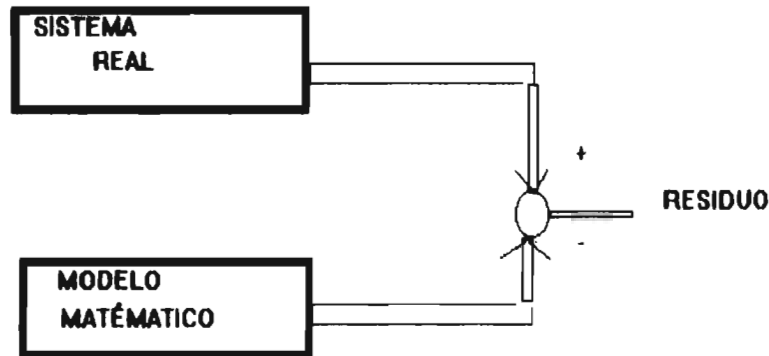


figura. 4.1 Diagrama utilizado para el método del residuo

Este método de detección de fallas es muy fácil de implementar, ya que no requiere de operaciones complicadas con las salidas del proceso, ni se aplican señales de entrada elaboradas. Una vez que se toma la primera lectura de las salidas del proceso como condiciones iniciales para las ecuaciones diferenciales que forman el modelo, éstas son resueltas sin considerar la evolución del proceso real, y paralelamente, se van adquiriendo las salidas del proceso.

Con lo anterior se obtiene el residuo, que se define como la diferencia entre las salidas medidas del proceso y las calculadas por el modelo

$$\begin{aligned} e_1 &= h_{\text{real } 1} - h_{\text{modelo } 1} \\ e_2 &= h_{\text{real } 2} - h_{\text{modelo } 2} \\ e_3 &= h_{\text{real } 3} - h_{\text{modelo } 3} \end{aligned}$$

41

El modelo usado para describir la evolución del sistema de tres tanques es el descrito en el capítulo 3 por las ecuaciones (3.18-3.26). El cual se presenta ahora con algunas modificaciones las cuales se usarán principalmente en la etapa de simulación; las mismas serán enseguida explicadas.

MODELO

Tanque 1

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_0 - Q_1 - Q_2}{a_1} \quad 4.2$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \text{sig}(h_1 - h_3) \left\{ \frac{A_{p2} \text{abs}(h_1 - h_3) g}{L} - \frac{K A_{p2} Q_2^2}{\rho} \right\} \quad 4.3$$

$$Q_1 = \frac{h_1 q w_1}{R_1} \quad 4.4$$

Tanque 3

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{Q_2 - Q_3 - Q_4}{a_3} \quad 4.5$$

$$\frac{dQ_4}{dt} = \text{sig}(h_3 - h_2) \left\{ \frac{A_{p4} \text{abs}(h_3 - h_2) g}{L} - \frac{K A_{p4} Q_4^2}{\rho} \right\} \quad 4.6$$

$$Q_3 = \frac{h_3 q w_3}{R_3} \quad 4.7$$

Tanque 2

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Q_4 - Q_5 - Q_6 + Q_7}{a_2} \quad 4.8$$

$$Q_5 = \frac{h_2 q w_5}{R_5} \quad 4.9$$

$$Q_6 = \frac{h_2 q w_4}{R_7} \quad 4.10$$

En el modelo antes descrito, q_{wi} tiene el valor de 0 ó 1 que se usará para simular si se abre o se cierra una válvula. Además las áreas a_1 , a_2 y a_3 , que corresponden a las áreas de cada tanque, físicamente son todas iguales, pero como son parámetros físicos a identificar (para el método fundado en identificación de parámetros), cada una se maneja de forma independiente.

Como ya se menciono, los esquemas de detección de fallas se probaron tanto en simulación como en forma experimental. Como primer paso se describen las pruebas realizadas en simulación.

Etapa de simulación

En la etapa de simulación se procedió de la siguiente manera. se tomaron dos modelos iguales, a uno de estos se le introdujo una a una las diferentes fallas, mientras que el otro modelo permaneció sin modificaciones.

La forma en que se fueron introduciendo estas fallas, fue proponiendo expresiones matemáticas para éstas, las cuales se dan en la tabla 4.1 que a continuación aparece. En ésta, la segunda fila da la propiedad que caracteriza a la falla y en la siguiente presenta su representación matemática.

Tabla 4.1 Relaciones matemáticas empleadas para simular fallas

FALLA	PROPIEDAD DE LA FALLA	MODELO MATEMÁTICO
la bomba 1 da menos de lo requerido	$Q_0 < Q_0 \text{ orig}$	$.7Q_0$
la bomba 2 da menos de lo requerido	$Q_7 < Q_7 \text{ org}$	$.7Q_7$
tapón entre t1 y t3	$Ap_2 = 0$	
tapón entre t3 y t2	$Ap_4 = 0$	
Error constante en el sensor 1	$h_1 = h_1 + dh_1$	$dh_1 = -.03h_1$
Error constante en el sensor 2	$h_2 = h_2 + dh_2$	$dh_2 = -.03h_2$
Error constante en el sensor 3	$h_3 = h_3 + dh_3$	$dh_3 = -.03h_3$
obstrucciones	$0 < ap_2 < .0005$ $0 < ap_4 < .0005$	$Ap_2 = .5Ap_2$ $Ap_4 = .5Ap_4$
fuga al tanque 1	$Q_1 > 0$	$qw_1 = 1$
Fuga al tanque 2	$Q_3 > 0$	$qw_3 = 1$
fuga al tanque 3	$Q_5 > 0$	$qw_5 = 1$

Así mismo, en la tabla 4.2 se explica con más precisión la característica que se busco con cada uno de los modelos de cada falla.

Tabla 4.2 Características de las fallas simuladas

Fallas en bombas	Se considera un valor menor del flujo que regularmente se tiene. Para este caso sólo se aplica un 70% del valor considerado normalmente.
Tapones	Para representar un tapón en un ducto, únicamente se hace cero el área de este ducto ($A_{p_i}=0$)
Fallas en sensores	A la salida del sistema se le resta una cantidad equivalente al error que se desea.
Fugas	Se activan los flujos Q_1 , Q_3 ó Q_5 , los cuales no son considerados en condiciones normales

Como se mencionó, para esta etapa se empleo al programa SIMNON desarrollado por el Automatic Control Lund Institute of Technology, el cual es propuesto para la simulación de procesos en tiempo continuo así como sistemas dinámicos discretos. En él se emplean rutinas de integración numérica para las ecuaciones diferenciales, mientras que las ecuaciones de diferencias, que describen a los sistemas discretos, son resueltas por métodos iterativos.

A continuación se muestran algunos de los resultados que se obtuvieron en esta etapa. En las siguientes figuras, se muestra en una primera gráfica el comportamiento tanto de una salida del sistema ideal (sin falla) así como la misma salida para un sistema con una falla, y en una segunda gráfica, se muestra la diferencia de estas dos salidas es decir su residuo. En ambos casos, el eje de las abscisas tiene como unidades segundos y el de ordenadas metros.

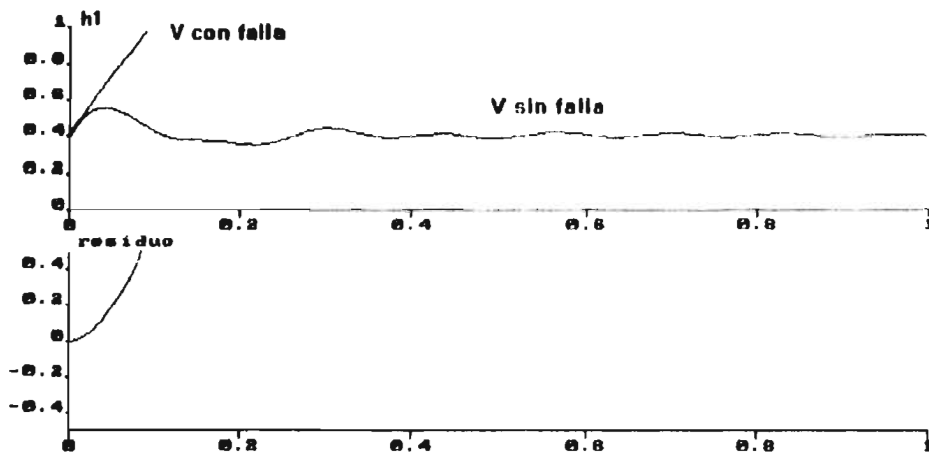


Figura 4.2 Evolución de del nivel del tanque 1 y su residuo ante una obstrucción en el tubo que une al tanque 1 con el tanque 3

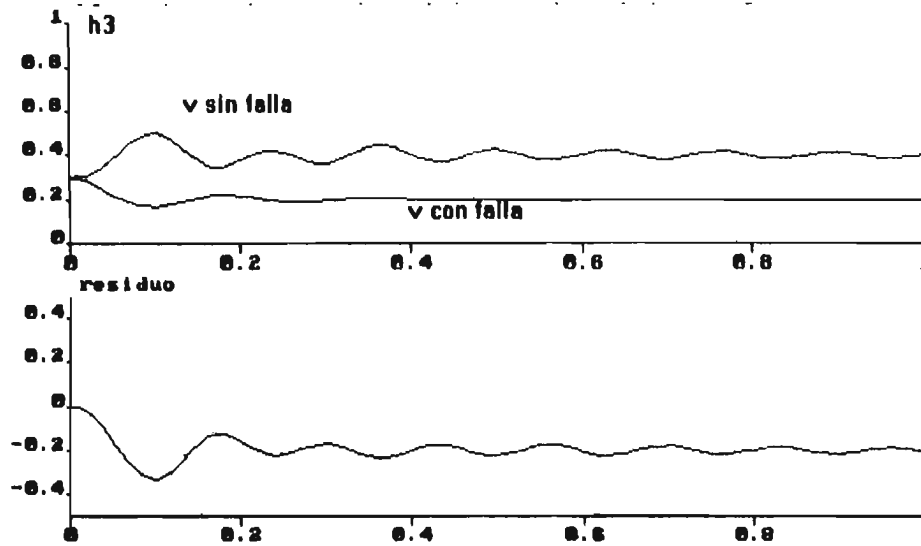


Figura 4.3 Evolución del nivel del tanque 3 y su residuo ante un a obstrucción en el tubo que une al tanque 1 y al tanque 3

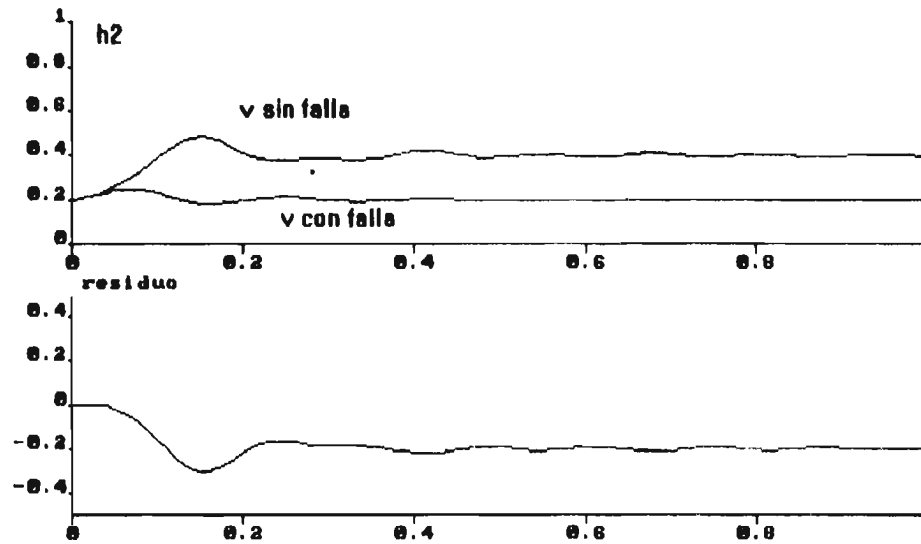


Figura 4.4 Evolución del nivel del tanque 2 y su residuo ante un a obstrucción en el tubo que une al tanque 1 y al tanque 3

En las gráficas anteriores, (figuras 4.2, 4.3, 4.4) se simula un tapón entre el tanque 1 y el tanque 3, en las que se muestra como el residuo del tanque 1 tiende a aumentar sin limite, mientras que al no recibir el flujo esperado, los otros dos tanques presentan una disminución en su nivel.

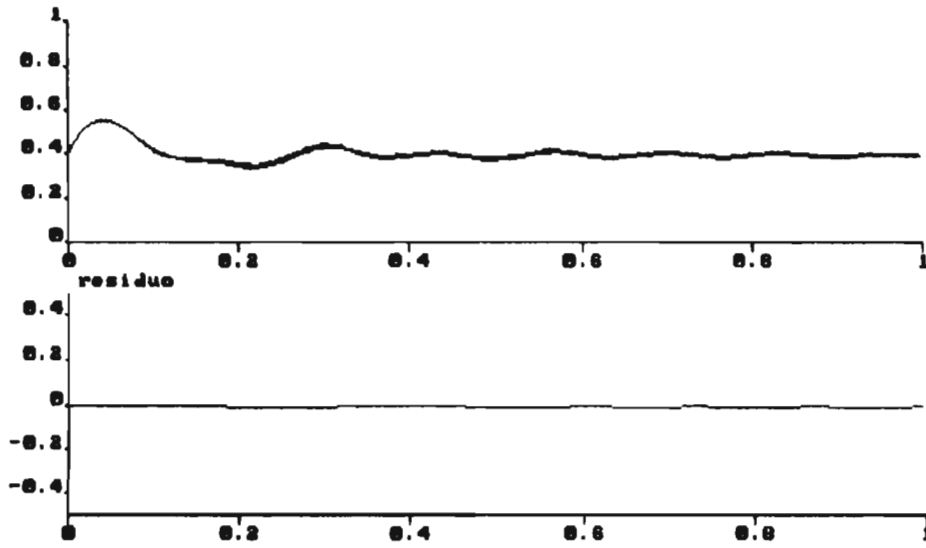


Figura 4.5 Evolución del nivel del tanque 1 y su residuo con un error en el sensor 2 del 30% (potenciometro al 70%)

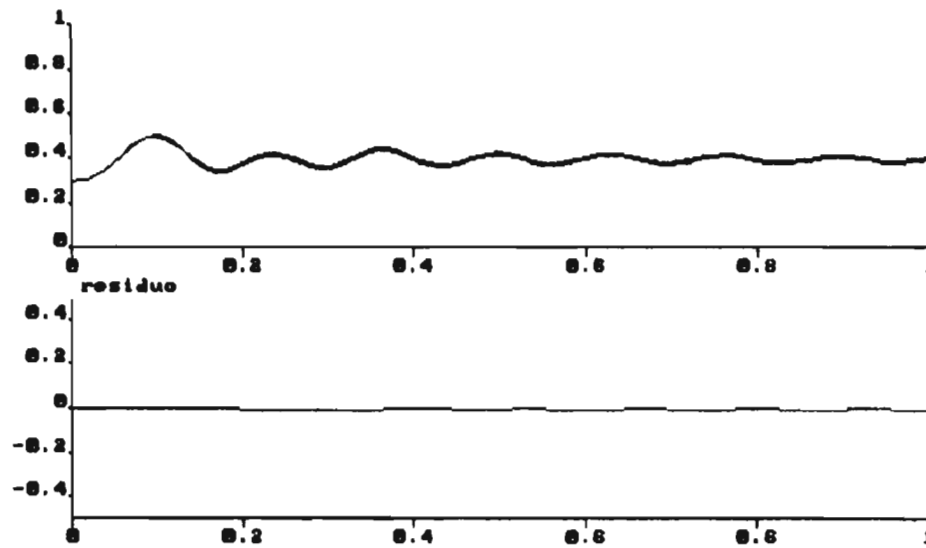


Figura 4.6 Evolución del nivel del tanque 3 y su residuo con un error en el sensor 2 del 30% (potenciometro al 70%)

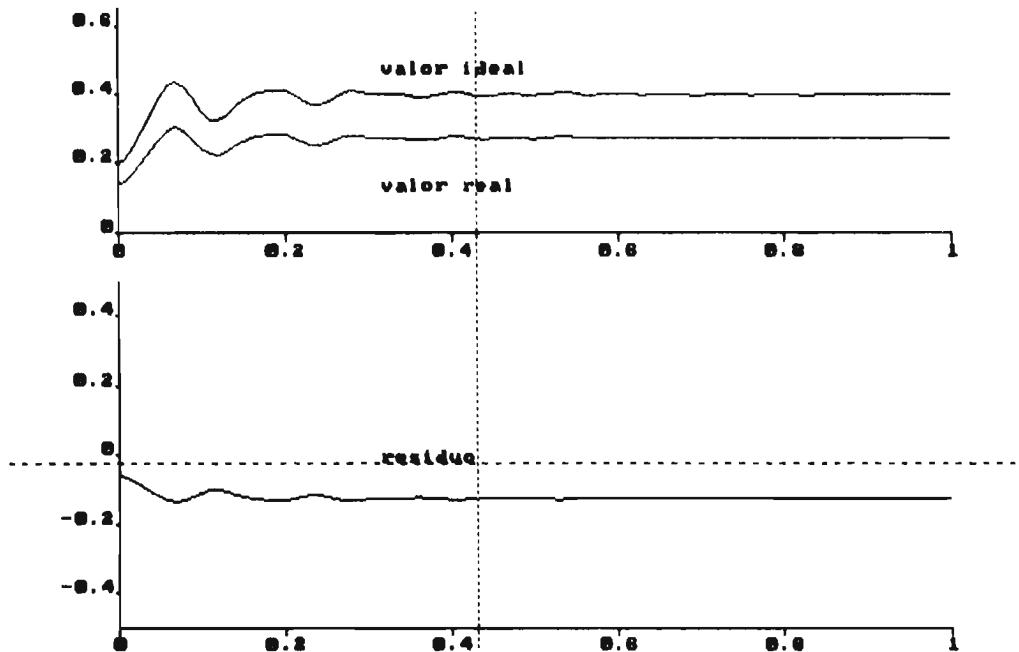


Figura 4.7 Evolución del tanque 2 con un error del 30%
(potenciometro al 70%)

En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se presenta el comportamiento del sistema cuando es alterado el potenciometro relacionado con el sensor del tanque dos. En estas se encuentra que únicamente el nivel del tanque 2, presenta un decremento del nivel hasta alcanzar un valor constante, mientras que los otros dos no se percatan de la falla.

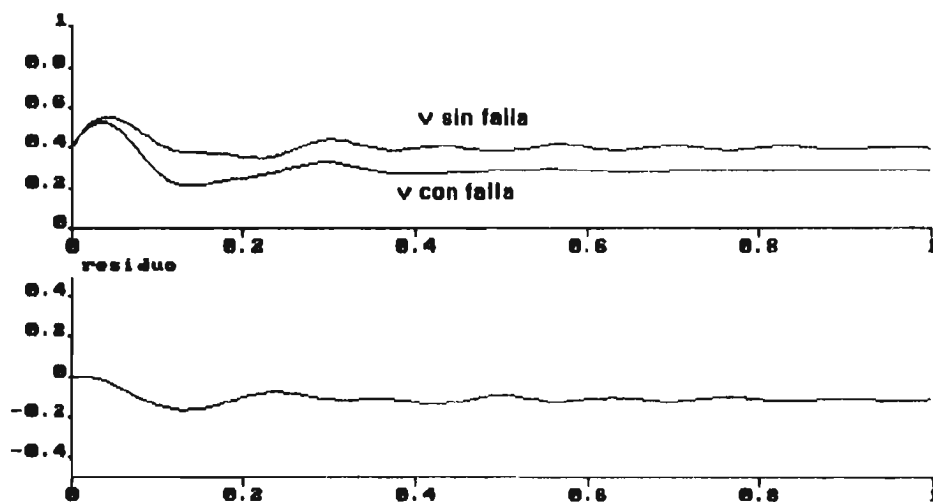


Figura 4.8 Evolución del nivel del tanque 1 y su residuo cuando se tiene una fuga en el tanque 3

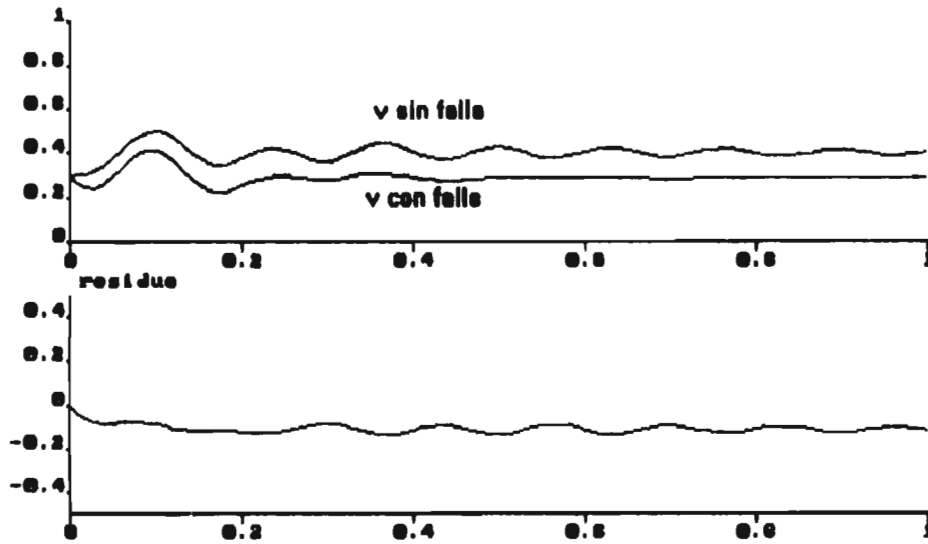


Figura 4.9 Evolución del nivel del tanque 3 y su residuo cuando se tiene una fuga en el tanque 3

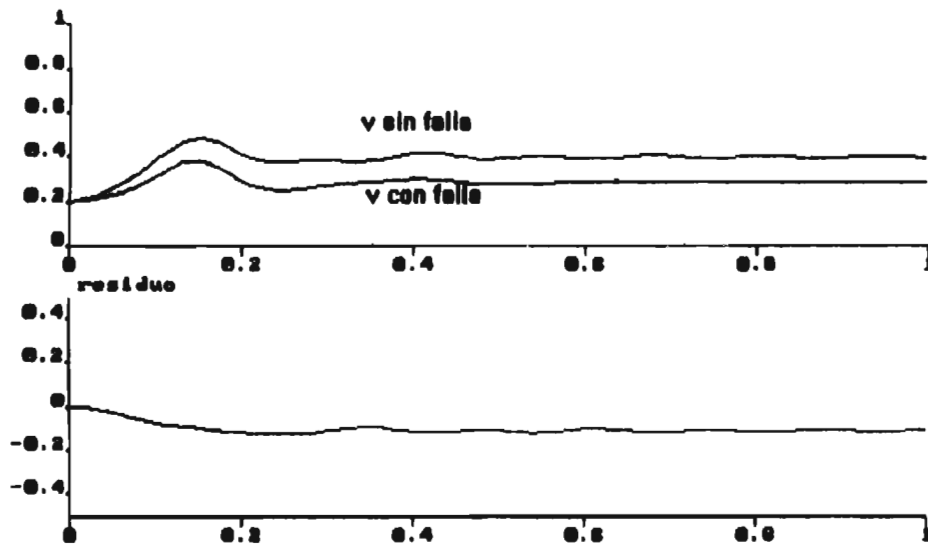


Figura 4.10 Evolución del nivel del tanque 2 y su residuo cuando se tiene una fuga en el tanque 3

En esas figuras (4.8, 4.9, 4.10) se muestra el comportamiento del sistema cuando se presenta una fuga en el tanque 3. En ellas se nota una disminución en los niveles de los tres tanques.

Etapa experimental

La etapa experimental se llevo a cabo de la siguiente manera. se comparan las salidas del equipo con las salidas del modelo matemático del mismo; la diferencia entre estos indica la presencia de fallas en el sistema.

Para esto, el modelo matemático descrito por las ecuaciones 4.1 a 4.9 es integrado por el método de Euler mejorado, que a continuación se describe.

Sea la ecuación diferencial

$$\frac{dh}{dt} = f(t)$$

Tomando como condiciones iniciales h_0 (las primeras lecturas de los niveles de los tanques) y como δ es el paso de integración [6], la solución de la ecuación anterior, se aproxima mediante la formula

$$h_t = \frac{\delta}{2} \left(\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t-1} + \left. \frac{dh}{dt} \right|_t \right) + h_{t-1}$$

Ya que se ha resuelto el modelo, se tienen las salidas de este, se forma el residuo, con la diferencia de la salida del proceso y la salida del modelo. En el método de detección de fallas por modelos físicos se espera que mientras el proceso se halle en buenas condiciones este residuo será casi cero, ya que si sobrepasa una tolerancia preestablecida se dirá que se presenta una falla. Los modelos son una buena aproximación de un proceso, mas no son exactos por lo cual el residuo nunca es cero, sino que oscila al rededor de cero cuando no hay falla; a continuación se muestran algunos resultados.

En las siguientes gráficas, sobre el eje de las ordenadas se presenta la evolución de los residuos en centímetros, y en el eje de las abscisas se halla el tiempo del experimento en segundos.

Con el fin de facilitar la interpretación de las gráficas que a continuación se mostraran, un dato de interés que se considera es el tiempo transcurrido en un sólo ciclo de supervisión, para lo cual se midió el tiempo transcurrido cuando el contador, que se le puso al sistema, corría entre la marca 100 y la marca 200, al repetir este proceso quince veces se obtiene que el periodo de supervisión es de 0.25 segundos, que es el tiempo requerido por la computadora para resolver el modelo y formar el residuo.

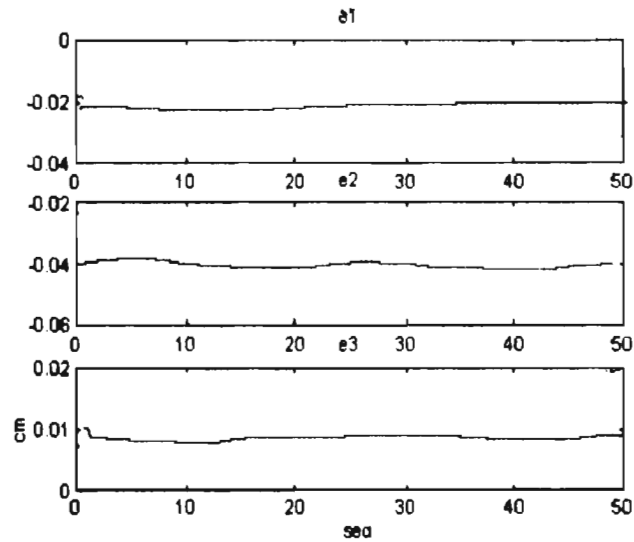


Figura 4.11 Evolución de los residuos cuando no se tiene falla

En la figura 4.11 se muestra el funcionamiento del equipo en tiempo real sin falla. En ésta se ve como cada residuo se comporta dentro de un intervalo al cual se le da una tolerancia de ± 0.02 centímetros.

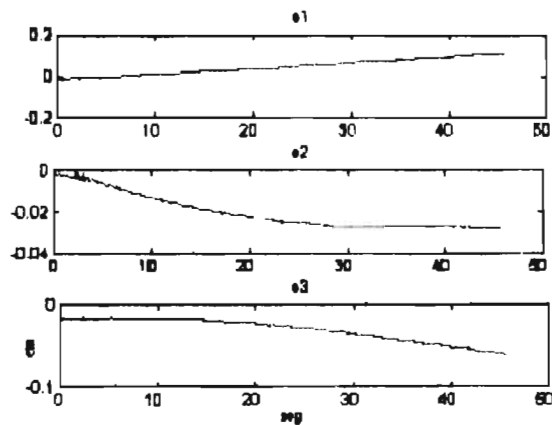


Figura 4.12 Evolución de los residuos cuando se tiene un tapón entre el tanque 1 y el tanque 3

La primera falla que se presenta es un tapón entre los tanques 1 y 3 (figuras 4.12). En ésta, el residuo del tanque 1 aumenta, al no tener ninguna salida el agua que la bomba 0 vierte en él. Así mismo, el tanque 3 como no recibe el líquido que debería, su nivel baja, como lo muestra su residuo. Lo mismo sucede con el tanque 2, sin embargo debido a la dinámica del sistema, el tanque 2 presenta esta disminución de nivel tiempo después que el tanque 3.

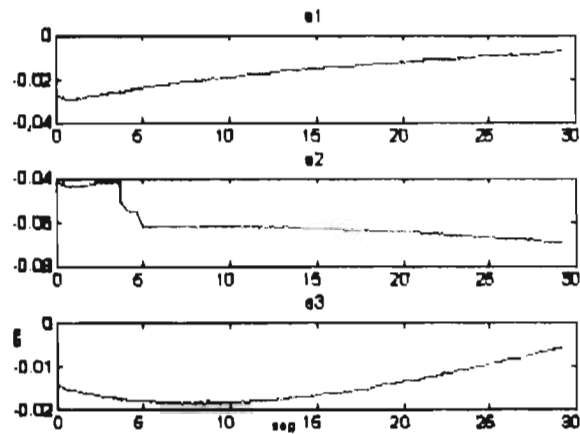


Figura 4.13 Evolución de los residuos cuando el sensor del tanque 2 presenta un error del 30% (potenciometro al 70%)

En segundo lugar, se consideró un error del 30% (potenciometro al 70%) sobre el sensor 2, como se muestra en la figuras 4.13. En este caso, el residuo 2 de inmediato decrece considerablemente hasta alcanzar un valor, los otros dos residuos sufren pequeños cambios, pero no son tan drásticos como él ya señalado.

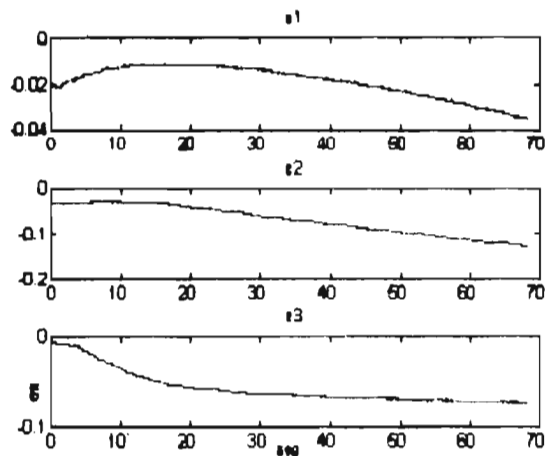


Figura 4.14 Evolución de los residuos cuando el tanque 3 tiene una fuga

Cuando se tiene una fuga en el tanque 3, la evolución de los residuos aparece en la figura 4.1. En estas figuras se observa que el residuo del tanque 3 presenta un decremento casi instantáneo. El residuo 2 tiende a decrecer, pero tarda en hacerlo. Por otro lado, no se observa ningún cambio sobre el residuo 1.

**4.1.2 LÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS USANDO
MODELOS FÍSICOS**

tabla 4.3 Huellas obtenidas por el método de modelos físicos

	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
q1 al 70 %			
q2 al 70%			
tapon t1 & t3			
tapon t3 & t2			
sensor 1 al 70%			
sensor 2 al 70%			
sensor 3 al 70%			
fuga al tanque 1			
fuga al tanque 2			
fuga al tanque 3			

Una vez que se concluyó un ciclo que consistió en estudiar la misma falla hasta diez veces, para formar las gráficas de los promedios para todos los residuos de las fallas consideradas, éstas fueron resumidas en la tabla 4.3, en la cual, al ser creada no se consideraron las magnitudes que cada residuo pudiese tomar, sino tan sólo la tendencia que seguían. Aquí se observó que cada residuo tomaba una inclinación muy particular en una determinada falla, lo cual las hace fácil de distinguir; de estas observaciones, se propone considerar que al conjunto formado por los tres residuos (uno por tanque) de cada falla, se le conocerá como firma o huella de la falla.

De las firmas obtenidas, se desarrolló una lógica, que permitirá la detección localización y cuantificación de fallas.

En las firmas antes mostradas en la tabla 4.3, se encontró que hay dos características que permiten diferencias entre ellas. De estas características se definen los índices de falla, que serán utilizados para caracterizar cada una de éstas, como a continuación se muestran:

El primer índice que se propone es el error de falla, que se define como el residuo obtenido dividido entre la salida del proceso

$$ep_i = \frac{h_{proci} - h_{modi}}{h_{proci}} \quad i=1,2,3 \quad 4.11$$

Con éste se logra una comparación entre la salida del proceso y la del modelo, teniendo así un valor normalizado que permite determinar cambios de magnitud en el residuo.

El segundo índice de falla, es la pendiente del residuo que se define como

$$pendiente = \frac{residuo_i - residuo_{i-1}}{\Delta} \quad i=1,2,3 \quad 4.12$$

Con este índice es posible conocer la inclinación que presenta el residuo entre dos puntos. En el programa este índice se llamará MPM_i . Para este trabajo se empleó un intervalo de diez muestras para determinar la pendiente, es decir $\Delta=10$

Un tercer índice de falla es el valor absoluto del error, definido por:

$$abe_i = |x_i| \quad i=1,2,3$$

que permite determinar si el residuo se encuentra dentro de una tolerancia

Con estos elementos se desarrolló la lógica, basada en el principio de umbral de índice (valor del índice a partir del cual la falla se empieza a manifestar) A continuación se describe esta lógica en la tabla 4.4 en cuya segunda columna se presentan las instrucciones

de programación mediante las cuales se localiza cada falla y en la tercer columna se explica que se busca con estas instrucciones.

Tabla 4 4 Lógica empleada en la localización de fallas para el esquema de modelos físicos

fuga en tanques	fuga en tanque 1 if (MPM1<-.001 && ep1<-.2)	El residuo del tanque 1 decrece rápidamente, lo que se denota por su pendiente.
	fuga al tanque 2 if (MPM2<-.01 && ep2<-.03)	El residuo del tanque 2 decrece con una pendiente considerada
tapones	fuga al tanque 3 if (MPM3<-.02 && ep3<-.03)	El residuo 3 decrece con una pendiente pronunciada
	tapón t1 & t3 if (MPM1>.006 && ep1>0 && ep3<-.01 tapón t3 & t2 if (/ep3>.015 && MPM3>0.01 && ep2<-.1)	Para este caso el residuo 1 aumenta rápidamente, mientras que el error 3 decrece. El residuo 3 aumenta rápidamente, en cambio el residuo 2 tiende a disminuir.
falla sensores	en sensor 1 if (ep1<-.12 && abe2<.5 && abe3<.5 && MPM1>0)	El residuo 1 decrece, y tiende a tomar un valor constante a diferencia de la fuga. Se espera que los otros dos residuos se mantengan acotados.
	sensor 2 if (abe1<.3 && ep2<-.5 && abe3<.5 && MPM2<.002)	El residuo 2 decrece hasta un valor definido, los otros dos residuos se mantienen dentro de la tolerancia
	sensor 3 if (abe1<.8 && abe2<.8 && ep3<-.1 && MPM3<.01)	El residuo 3 decrece a un valor definido, manteniendo los otros residuos dentro de su cota.

siendo && el comando lógico “y”

Los umbrales de falla se ubicaron experimentalmente, sometiendo al equipo a la misma falla diez veces, obteniendo un promedio de las magnitudes de los índices de falla para cada una de estas.

Por otro lado, en la lógica desarrollada para cada falla en particular, sólo se emplean algunos de los nueve parámetros que se tienen considerados, pues únicamente se buscan las cualidades más peculiares de cada falla.

4.1.3 CUANTIFICACIÓN DE LOS ERRORES EN SENSORES

De las fallas que se aplican al sistema piloto de tres tanques, la que se introduce a los sensores es la única que se puede cuantificar, ya que se aplica alterando los potenciómetros de los sensores de nivel que se describen en el capítulo 3

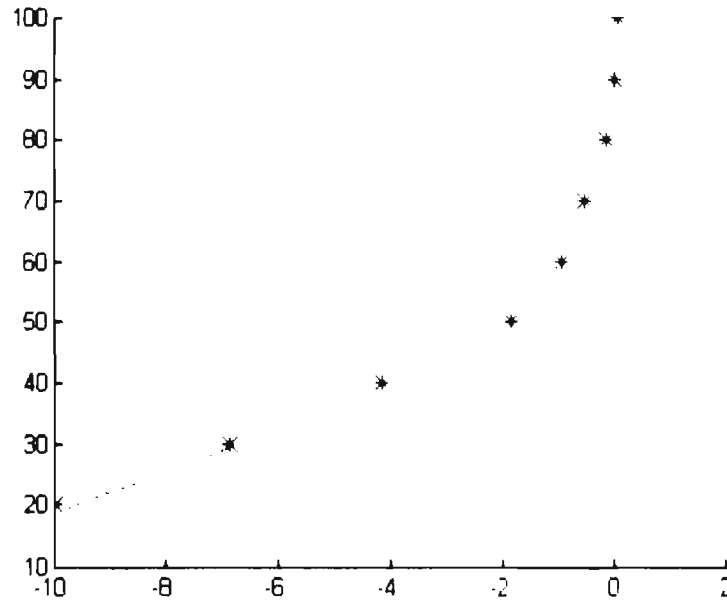


Figura 4.15 gráfica utilizada en la calibración del sensor 1

En el desarrollo de la metodología para cuantificar los errores en sensores se propuso variar uno a uno los potenciómetros de la consola en cantidades conocidas registrando las magnitudes de los índices obtenidos en régimen estable.

De los resultados se observó que sólo el residuo asociado al tanque donde se presenta la falla toma valores importantes, los demás residuos no se ven afectados.

Tabla 4.5 Datos usados para calibrar el sensor 1

Error falla	Porcentaje
-1.5493	20
-6.8448	30
-4.13	40
-1.8364	50
-0.9269	60
-0.5266	70
-0.1639	80
0.0028	90
0.0603	100

En la tabla 4.5 aparece la forma en que cambia el error promedio en el tanque 1, en función del porcentaje de error introducido.

Los resultados de la tabla 4.5 aparecen gráficamente en la figura 4.15. Estos resultados son sometidos a procesos de mínimos cuadrados, determinando la siguiente relación matemática:

$$\text{sensor1} = 79.351e^{145ep1} \quad 4.13$$

Con la expresión anterior el esquema de detección de fallas tendrá la posibilidad de cuantificar la falla cuando se detecte una falla en el sensor 1.

De manera análoga se obtienen las expresiones que relaciona el error introducido y el valor del índice de falla para los otros dos sensores.

$$\text{sensor2} = 81.77e^{016ep2}$$

$$\text{sensor3} = 70.39e^{106ep3}$$

4.2 DETECCIÓN DE FALLAS EMPLEANDO OBSERVADORES

Una forma de detección de fallas empleando observadores consiste en proponer un banco de n observadores de orden reducido, donde n es el número de salidas del sistema. Cada observador estima el valor de una salida del sistema a partir de las entradas y las otras $n-1$ salidas, la salida estimada h_{obs} del proceso es comparada con la salida medida h_{real} formando así el residuo $e_i(t) = h_{real} - h_{obs}$, si este residuo $e_i(t)$ es mayor a una tolerancia preestablecida, se tiene una falla, cada falla presenta un comportamiento específico sobre el vector de residuo $e(t)$, lo que permite detectar, localizar y cuantificar las fallas en el sistema

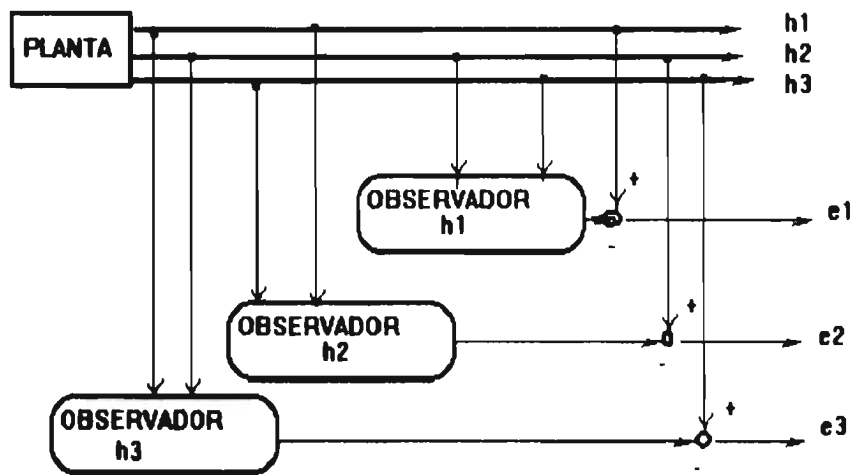


Figura 4 16 Esquema de detección de fallas por observadores

El modelo del sistema de tres tanque considerado en la detección de fallas empleando observadores fue:

Ecuación de estado

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s1 & 0 & 0 & 11 & 0 \\ 0 & s2 & 0 & 0 & 12 \\ 0 & 0 & s3 & 13 & -14 \\ s4 & 0 & -s4 & 15 & 0 \\ 0 & -s5 & s5 & 0 & 15 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b1 & 0 \\ 0 & b2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_6 \\ Q_7 \end{bmatrix} \quad 4.14$$

Ecuación de salidas

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} \quad 4.15$$

siendo

$$s1=qw1/r1=0$$

$$s2=qw2/r2+qw6/r6=1/6$$

$$s3=qw3/r3=0$$

$$s4=ap2*\rho/l=0.049$$

$$s5=ap4*\rho/l=0.049$$

$$l1=l2=l3=l4=1/a=64.93$$

$$l5=\text{sig}(h_1-h_3)ap2*k/\rho=\text{sig}(h_1-h_3)2.22 \times 10^{-7}$$

$$l6=\text{sig}(h_3-h_2)ap4*k/\rho=\text{sig}(h_3-h_2)2.22 \times 10^{-7}$$

Este modelo es el mismo deducido en el capítulo 3, al que se le dio una forma matricial.

En las ecuaciones del modelo 4.3 y 4.6, los términos cuadráticos de Q_2 y Q_4 se hallan asociados con coeficientes de pequeña magnitud 2×10^{-7} , por lo que se observó en simulación que no era apreciable la diferencia al tratar estos términos como cuadráticos o lineales.

Para aplicar este método, en primer lugar, al modelo del proceso se le da la forma

2.11

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} U \quad 4.16$$

que permite el uso del observador de orden reducido. Donde en x_b se compone tanto de la salida que se desea observar así como algunos estados no medibles, mientras que x_a se forma del resto de las salidas medibles. Esto permite aplicar la fórmula del observador de orden reducido deducida en el capítulo 2

$$\dot{v} = (A_{bb} - kA_{ab})v + [(A_{bb} - kA_{ab})k + A_{ba} - KA_{aa}]y + (B_b - KB_a)U \quad 4.17$$

con

$$v = x_b - Kx_a$$

4.18

Para seguir este procedimiento al modelo del sistema de tres tanques, se da las siguientes formas (una por cada salida), con lo que se tendrá el banco de observadores antes mencionado.

Para observar h_1

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_2 \\ h_3 \\ h_1 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & s2 & 0 & 0 & 12 \\ 0 & 0 & s3 & 13 & -14 \\ s1 & 0 & 0 & 11 & 0 \\ s4 & 0 & -s4 & 15 & 0 \\ 0 & -s5 & s5 & 0 & 16 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_2 \\ h_3 \\ h_1 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b2 \\ 0 & 0 \\ b1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_7 \end{bmatrix} \quad 4.19$$

para observar h_2

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_3 \\ h_2 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s1 & 0 & 0 & 11 & 0 \\ 0 & 0 & s3 & 13 & -14 \\ 0 & s2 & 0 & 0 & 12 \\ s4 & 0 & -s4 & 15 & 0 \\ 0 & -s5 & s5 & 0 & 16 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_3 \\ h_2 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_7 \end{bmatrix} \quad 4.20$$

para h_3

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s1 & 0 & 0 & 11 & 0 \\ 0 & s2 & 0 & 0 & 12 \\ 0 & 0 & s3 & 13 & -14 \\ s4 & 0 & -s4 & 15 & 0 \\ 0 & -s5 & s5 & 0 & 16 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b1 & 0 \\ 0 & b2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_7 \end{bmatrix} \quad 4.21$$

Tomemos a h_1 como ejemplo; el desarrollo para su observador es el siguiente:

Como primer paso se calcula el observador de orden reducido, a partir del cual se halla el valor de v

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \left[\begin{pmatrix} 0 & 11 & 0 \\ -s4 & 15 & 0 \\ s5 & 0 & 16 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k1 & 0 \\ 0 & k4 \\ k5 & k6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 12 \\ s3 & 13 & -14 \end{pmatrix} \right] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
& + \left\{ \left[\begin{pmatrix} 0 & 11 & 0 \\ -s4 & 15 & 0 \\ s5 & 0 & 16 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k1 & 0 \\ 0 & k4 \\ k5 & k6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 12 \\ s3 & 13 & -14 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} k1 & 0 \\ 0 & k4 \\ k5 & k6 \end{pmatrix} + \right. \\
& \left. \begin{pmatrix} s1 & 0 \\ s4 & 0 \\ 0 & -s5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k1 & 0 \\ 0 & k4 \\ k5 & k6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & s2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} h_2 \\ h_3 \end{pmatrix} \\
& + \left[\begin{pmatrix} B1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k1 & 0 \\ 0 & k4 \\ k5 & k6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & B2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_7 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Una vez que se tiene a v es posible encontrar el valor estimado h_1 mediante la transformación siguiente.

$$\begin{pmatrix} \bar{h}_1 \\ Q_2 \\ Q_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k1h_2 \\ k4h_3 \\ k5h_2 + k6h_3 \end{pmatrix} \tag{4.23}$$

Los observadores para los otros dos niveles se obtienen de forma similar.

Un aspecto importante en el diseño del observador es la selección de K_c . Como una primera opción, para realizar algunos experimentos preliminares se propuso una constante K_c de la siguiente forma.

$$K_c = \begin{pmatrix} k1 & 0 \\ 0 & k4 \\ k5 & k6 \end{pmatrix} \tag{4.24}$$

con la cual se reducía el volumen de cálculo, permitiendo mayor flexibilidad en el momento de estar programando. Aunque ya se había contemplado la necesidad de emplear más elementos en esta matriz, con estos experimentos sólo se iniciaban los estudios para hallar la mejor matriz K_c , pero como los resultados aquí obtenidos eran satisfactorios, se optó por dejar esta configuración, logrando con ésta que el vector de error sea asintóticamente estable y adecuadamente veloz, ya que no es mucho el tiempo transcurrido en que el valor de la salida observada converge al valor de la salida real.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas tanto en simulación como en tiempo real. Estas gráficas se muestran la evolución del sistema cuando no se tiene falla, así como las mismas tres fallas que se mostraron en el método de modelos físicos. En estas gráficas, el eje de las abscisas en el que se presenta el tiempo del experimento se halla en segundos, y el de las ordenadas en el que se presenta la diferencia entre la salida real y la observada en metros.

Resultados obtenidos en simulación

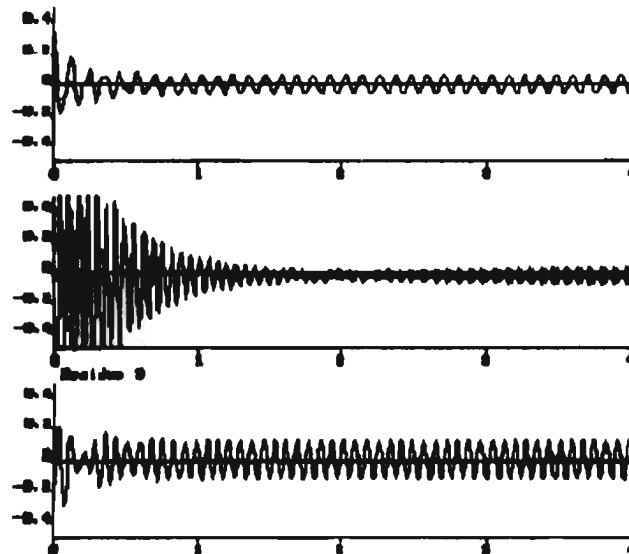


Figura 4.17 Evolución de las diferencias de las salidas real y observada cuando el sistema no presenta falla alguna

En la figura 4.17 se muestran los resultado obtenidos al emplear el banco de observadores antes descrito, en la detección de fallas, cuando en el sistema no se presenta ninguna falla.

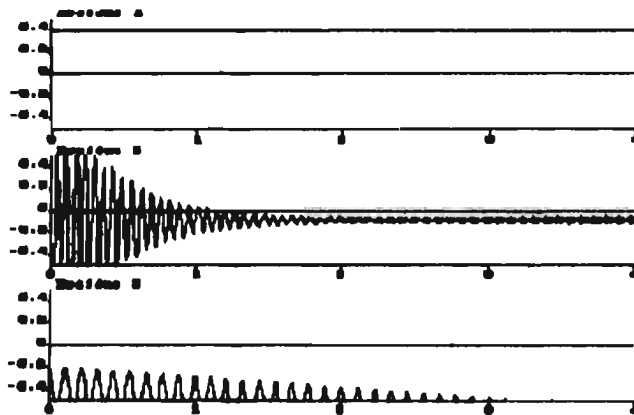


Figura 4.18 Evolución de la diferencia entre la salida real y la salida observada cuando el sistema presenta un tapón entre el tanque 1 y el tanque 3

En la figura 4.18 se presenta el comportamiento del sistema cuando se presenta un tapón entre los tanques 1 y 3, observándose un aumento en la diferencia del tanque 1 debido al exceso del líquido que entra por la bomba 0 y que no tiene ninguna salida. Así mismo al tanque 3 no le llega el líquido requerido por lo que tiende a disminuir su nivel, como lo muestra esta diferencia.

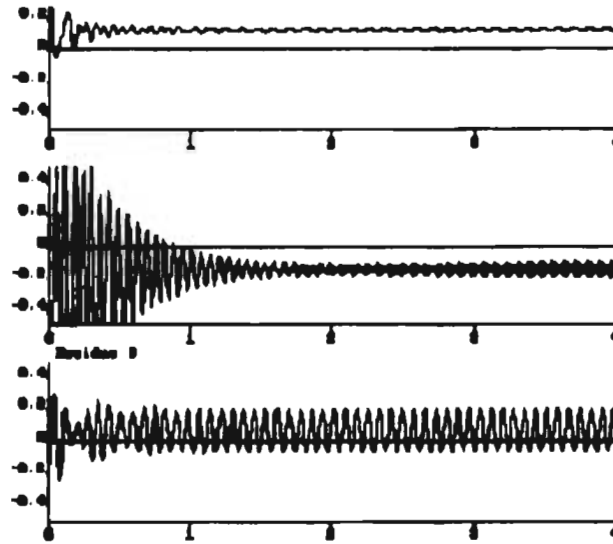


Figura 4.19 Evolución de la diferencia entre la salida real y la salida observada cuando se tiene un error del 30% sobre el sensor dos

En la figura 4.19 se tiene que al haber un error en el sensor 2, la diferencia de este tiene un decremento notorio, así también se observa un aumento no esperado en la diferencia del tanque 1

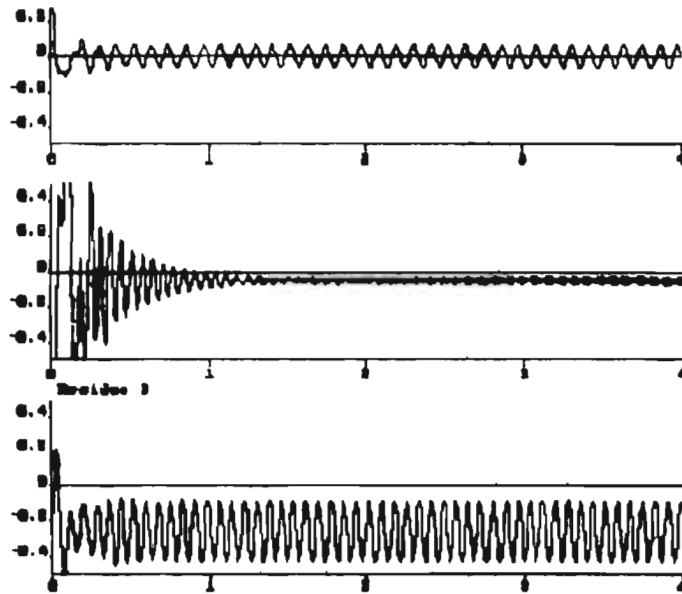


Figura 4.20 Evolución de la diferencia entre la salida real y la salida observada en el momento cuando se tiene una fuga en el tanque 3

Al presentarse una fuga en el tanque 3, como lo muestra la figura 4.20, se muestra un decremento en su diferencia, importante, así como en el tanque 2 pero menos considerable, ya que en este existe una salida del líquido a la cisterna; lo que no sucede en el tanque 1, por lo cual no parece percatarse de la falla.

Resultados obtenidos en tiempo real

La diferencia entre las salidas medida del proceso y sus estimados obtenidos en presencia de distintas fallas, en el caso de tiempo real, aparecen en las siguientes figuras. En éstas el tiempo empleado por el esquema de supervisión usando observadores es de 0.186 segundos, aquí se hace notar que se tiene más prontitud al tratar los observadores que al resolver el modelo del sistema para el esquema de modelos físicos. Para las siguientes gráficas el eje de las ordenadas se halla en centímetros.

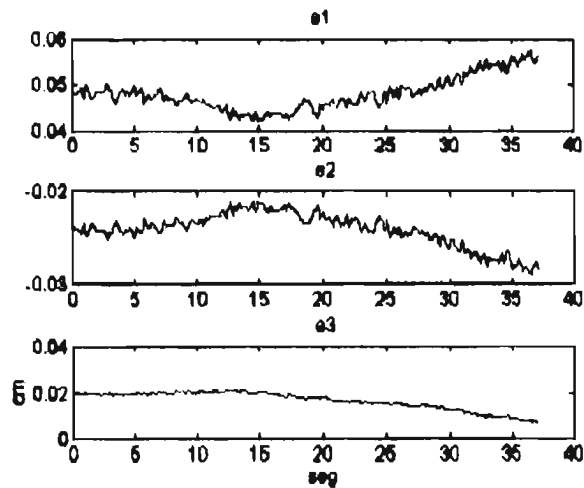


Figura 4.21 evolución de la diferencia entre el proceso y sus estimados cuando el sistema no presenta falla

En la figura 4.21 se presentan los residuos en condiciones normales (sin falla). Aquí se ve como los residuos permanecen oscilando dentro de un intervalo con una tolerancia de ± 0.02 centímetros.

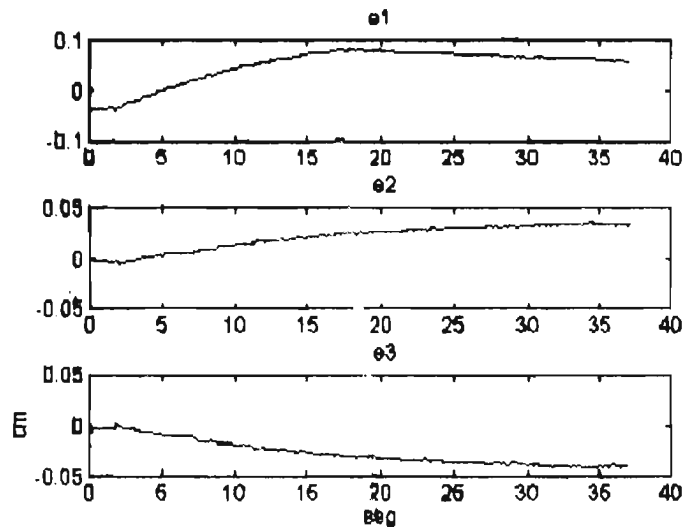


Figura 4.22 evolución de la diferencia entre la salida del proceso y sus estimados cuando el sistema presenta un tapón entre t1 y t3

La figura 4.22 corresponde al caso de un tapón entre el tanque 1 y el tanque 3. Se observa como aumenta el residuo 1, mientras que el residuo 3 tiende a disminuir. El residuo 2 crece al contrario de lo que se espera, ya que debería decrecer al no recibir el líquido que normalmente se le suministra

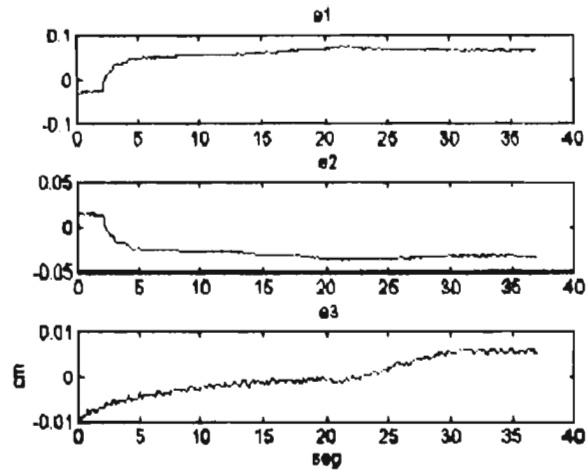


Figura 4.23 Evolución de la diferencia entre la salida del proceso y sus estimados cuando el sistema presenta un error del 30 % en el sensor 2

Al introducir un error al sensor 2 como se muestra en la figura 23, se encuentra una disminución en el residuo 2 que toma un valor casi constante. A la vez que el residuo 1 también aumenta a un valor constante. Aunque pareciera que se presenta una disminución en el valor del residuo 3, debido a las escalas, por el intervalo en que se halla se puede decir que no sufre cambio alguno.

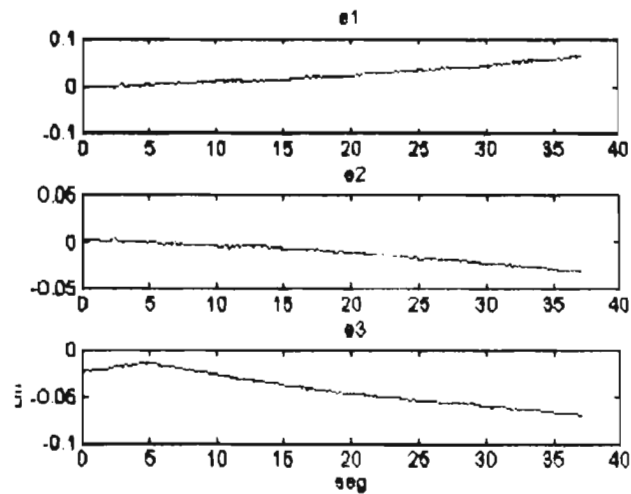
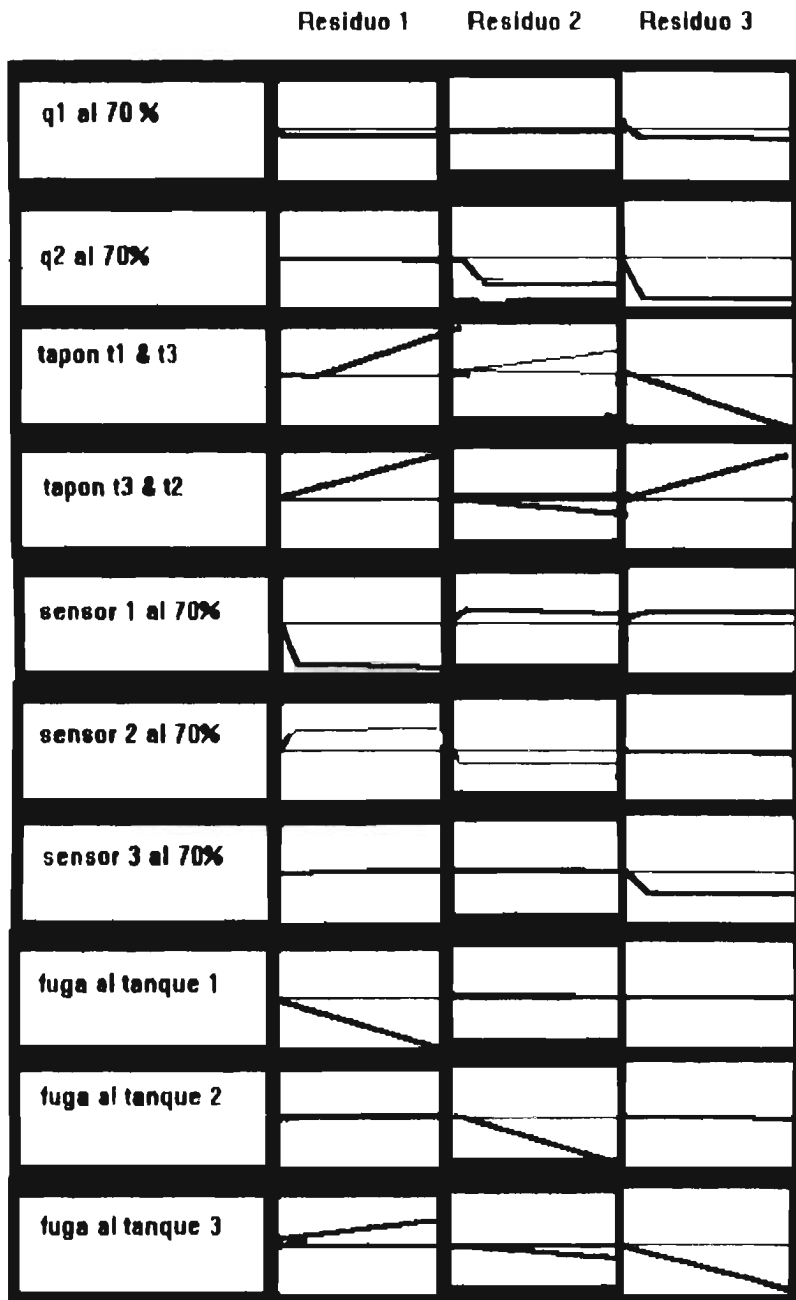


Figura 4.24 Evolución de la diferencia entre la salida del proceso y sus estimados cuando el sistema presenta una fuga al tanque 3

Para el caso de una fuga en el tanque 3, se presenta un decremento considerable al residuo 3, en el residuo 1 se observa un aumento, mientras que el residuo 2 tiende a decrecer.

4.2.2 LÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS POR OBSERVADORES

Tabla 4.6 Huellas de las diferentes fallas para el caso de observadores



Al igual que el método anterior, cada residuo es bosquejado en la tabla 4.6, obteniendo de esta forma las huellas de cada falla. A partir de esta es posible hacer diferencias entre las diferentes fallas.

De la tabla 4.6, se desarrolló una lógica para su localización, detección y cuantificación.

Debido a que como en el método anterior se utiliza la diferencia entre la salida real y la calculada para hacer la detección de fallas, es posible emplear los mismos índices de falla como se muestra en la tabla 4.7, en la que dentro de la segunda columna se da la expresión lógica que permite localizar la falla y en la tercera se plantea lo que con ella se busca.

Tabla 4.7 Instrucciones de C++ empleadas en la localización de fallas para el esquema basado en observadores

fugas	fuga al tanque 1	El residuo 1 disminuye rápidamente, con una pendiente pronunciada.
	if (MPM1 < -1 && ep1 < -0.08)	
	fuga al tanque 2	Aquí el residuo 2 disminuye, presentando una pendiente pronunciada.
	if (MPM2 < -0.01 && ep2 < -1)	
	fuga al tanque 3	El residuo 3 tiende a disminuir, presentando una pendiente pronunciada.
	if (MPM3 > 0.01 && ep3 < -1)	
tapones	tapón t1 & t3	El residuo del tanque 3 tiende a disminuir.
	if (MPM3 < -1 && ep3 < -0.6)	
	tapón t3 & t2	Los tanques 1 y 3 se comienzan a llenar rápidamente, mientras que el dos tiende a vaciarse.
	if (MPM1 > 0 && MPM2 < 0 && MPM3 > 0 && ep1 > -2 && ep3 > 0)	
fallas en sensores	sensor 1	El sensor 1 se sale de la cota de tolerancia, mientras que los otros dos permanecen dentro de los niveles que les corresponde.
	if (abe1 > 0.9 && abe2 < 5 && abe3 < 1)	
	sensor 2	El residuo 2 se sale de su cota hasta un punto bien definido, mientras que los otros dos permanecen en ella.
	if (abe1 < -1 && abe2 > 0.2 && abe3 < 5)	
	sensor 3	El residuo 3 se sale de su cota hasta un punto bien definido, mientras que los otros dos permanecen en ella.
	if (abe1 < 2 && abe2 > 3 && abe3 > 0.8)	

4.2.3 CUANTIFICACIÓN DEL ERROR EN SENSORES

De igual modo que en el caso anterior, se estableció una relación entre el error introducido, y la magnitud del error de falla que el esquema reporta

Como en caso de modelos físicos, se hizo variar uno a uno cada potenciómetro de la consola introduciendo ruido a un determinado sensor. Al mismo tiempo se van registrando los valores de los índices de falla. La prueba ha de repetirse varias veces con el fin de encontrar un valor promedio de cada uno de los índices de falla para cada porcentaje de error introducido. Este promedio sólo se hace sobre el índice de falla que es más afectado.

En la tabla 4.8 aparecen los datos cuando se presenta un error en el sensor 1. Aquí el error de falla 1 fue el más afectado. En la figura 4.21 se gráfica los datos de la tabla 4.8, para después, usando el método de mínimos cuadrados se encuentra la curva que más aproxima los puntos graficados.

Tabla 4.8 datos empleados para calibrar el sensor 1

Error falla	Porcentaje
-10.00	20
-6.8769	30
-2.6949	40
-1.1815	50
-0.7063	60
-0.2922	70
-0.1361	80
-0.0042	90
0.0517	100

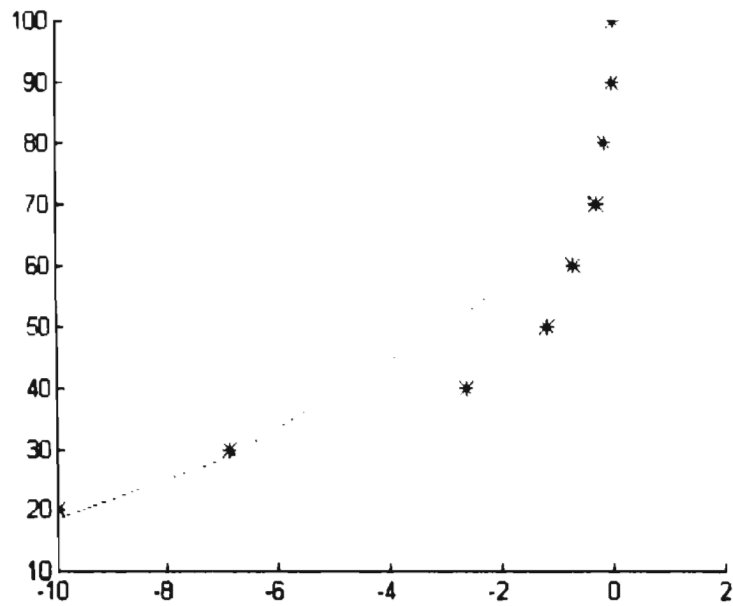


Figura 4.25 Gráfica de los datos empleados para calibrar el sensor 1

La curva teórica que se encontró para este ejemplo fue:

$$\text{sensor1} = 75e^{14pr1}$$

4.25

Para los otros dos sensores se tienen las siguientes expresiones:

$$\text{sensor2} = 7.4191pr2 + 74.8383$$

$$\text{sensor3} = 8.62pr3 + 91.99$$

Observase que estas ultimas tienen un comportamiento lineal.

4.3 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS EN LA DETECCIÓN DE FALLAS

La técnica de detección de fallas por identificación se basa en la determinación en línea de los parámetros de un modelo del proceso. Estos parámetros están relacionados con los parámetros físicos del mismo. Variaciones en los parámetros identificados del modelo se asocian a cambios en los parámetros físicos del mismo, indicando la presencia de un cambio no esperado o falla. Encontrar la relación entre los parámetros del modelo y los parámetros físicos del proceso no es fácil y en ocasiones no es única. Por lo general los parámetros identificados del proceso son una combinación de los parámetros físicos. Es posible la detección, localización y cuantificación de fallas al comparar la evolución de los parámetros identificados ante diferentes fallas con el comportamiento de estos parámetros cuando no hay falla.

Recordando al modelo matemático para determinar la altura del tanque 1

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_0 - Q_1 - Q_2}{a_1} \quad 4.26$$

el primer parámetro que se puede identificar es el área de cada tanque, ya que es el único involucrado tomando al modelo en continuo y, haciendo una analogía con la ecuación 2.39

$$\dot{y} = -\alpha y + bu \quad 4.27$$

donde $\alpha=0$

$$b=1/a_1$$

$$u=(Q_1-Q_2)$$

Aplicando los resultados del capítulo 2 es posible identificar los parámetros de esta expresión a partir de las ecuaciones 2.33, 2.34, 2.35, donde h_{1i} es el nivel estimado para el tanque 1. También se presentan los desarrollos para los otros dos tanques

$$h_{1i} = (\lambda - 1)w_1 + 14v_1 \quad 4.28$$

$$h_{2i} = (\lambda - 12)w_2 + 15v_2$$

$$h_{3i} = (\lambda - 13)w_3 + 16v_3$$

definiendo

$$w_1 = -\lambda w_1 + h_1 \quad 4.29$$

$$w_2 = -\lambda w_2 + h_2$$

$$w_3 = -\lambda w_3 + h_3$$

$$v1 = -(\lambda - t_1)v1 + t_4(Q_0 - Q_1 - Q_2) \quad 4.30$$

$$v2 = -(\lambda - t_2)v2 + t_5(Q_2 - Q_3 - Q_4)$$

$$v3 = -(\lambda - t_3)v3 + t_6(Q_4 - Q_5 + Q_7 - Q_6)$$

En realidad se tienen tres esquemas de identificación de la forma

$$h1 = [\lambda_a - t_1 \quad t_4] \begin{bmatrix} w_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \quad 4.31$$

$$h2 = [\lambda_b - t_2 \quad t_5] \begin{bmatrix} w_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad 4.32$$

$$h3 = [\lambda_c - t_3 \quad t_6] \begin{bmatrix} w_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad 4.33$$

Las ecuaciones de error son

$$e1 = h1 - h1 \quad 4.34$$

$$e2 = h2 - h2$$

$$e3 = h3 - h3$$

Aplicando el algoritmo gradiente

$$\dot{t}_4 = -g_4 v_1 e_1 \quad 4.35$$

$$\dot{t}_5 = -g_5 v_2 e_2$$

$$\dot{t}_6 = -g_6 v_3 e_3$$

De igualar la ecuación 4.27 con la ecuación 4.26 se encuentra

$$a1 = 1/t4 \quad t_1 = 0 \quad 4.36$$

$$a2 = 1/t5 \quad t_2 = 0$$

$$a3 = 1/t6 \quad t_3 = 0$$

Después de varias pruebas se observó que identificando las áreas a_1 , a_2 y a_3 no es suficiente para localizar fallas. Por esto se procedió a identificar las áreas de cada uno de los ductos que unen a los tanques, así como el coeficiente de fricción de éstas, procediendo de la siguiente manera:

Para identificar las áreas de estos ductos se utilizó un modelo de referencia, aprovechando que se contaba tanto con los niveles reportados por los sensores así como los que se obtuvo al identificar las áreas de los tanques (por ello se explica el desarrollo anterior), procediendo de la siguiente manera:

Sea el modelo matemático del gasto en los ductos

$$\frac{dq_2}{dt} = \text{sig}(h_1 - h_3) \left(\frac{A_p g}{L} \text{abs}(h_1 - h_3) - \frac{K A_p^2}{\rho} Q_2^2 \right) \quad 4.37$$

Si se sustituye en la ecuación 4.35 a los términos que involucran a las magnitudes físicas áreas, fricción, longitud del ducto por parámetros θ . Primero en función de las alturas que miden los sensores.

$$\frac{dq_2}{dt} = \text{sig}(h_1 - h_3) (\theta_1 \text{abs}(h_1 - h_3) - \theta_2 Q_2^2) \quad 4.38$$

en segundo lugar en función de las alturas estimadas con el modelo 4.26

$$\frac{dq_{2i}}{dt} = \text{sig}(h_{1i} - h_{3i}) (\theta_1 \text{abs}(h_{1i} - h_{3i}) - \theta_2 Q_2^2) \quad 4.39$$

Comparando los modelos 4.36 y 4.37 se tiene la ecuación de error.

$$e = \frac{dq_2}{dt} - \frac{dq_{2i}}{dt} \quad 4.40$$

Con objeto de estimar θ_1 y θ_2 se propone tomar como modelo 4.37 y como salida y del sistema 4.36 es decir

$$y = \frac{dq_2}{dt} \quad 4.41$$

por lo que el modelo a identificar tiene la forma

$$\hat{y} = \text{sig}(h_{1i} - h_{3i}) (\theta_1 \text{abs}(h_{1i} - h_{3i}) - \theta_2 Q_2^2) \quad 4.42$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1i} - h_{3i} \\ -\text{sig}(h_{1i} - h_{3i}) Q_2^2 \end{bmatrix}$$

Una vez que se identificaron los parámetros propuestos, se hallaron los parámetros físicos del modelo mediante las ecuaciones

$$A_{p2i} = \frac{\theta_1 L}{g} \quad 4.43$$

$$K_{li} = \frac{\theta_2 \rho}{A_{p2i}} \quad 4.44$$

Al presentarse una falla en el sistema el error, (4.38) es diferente de cero. Esto ocasiona que θ_1 y θ_2 varíen en el tiempo, lo cual es usado en la localización, detección y cuantificación de fallas.

Señal de entrada usada

Para la etapa de simulación así como al trabajar en tiempo real, las entradas que se emplearon, fueron señales binarias pseudoaleatorias, para garantizar la convergencia paramétrica como se señala en el Capítulo 2.

A continuación se presentan algunas figuras mostrando la evolución de los parámetros que se obtuvieron tanto en simulación como en tiempo real.

Etapa de simulación

Primeramente, para la etapa de simulación, tomando como proceso al modelo que se tenía del sistema de tres tanques, se procedió a identificar los niveles de cada tanque a partir de las ecuaciones 4.28 a 4.34. A continuación se forma la ecuación de flujo (4.38) en función de los parámetros θ , y los niveles del proceso, posteriormente se considera la ecuación de flujo (4.39) que es función de los parámetros θ y de los niveles identificados, teniendo así el esquema de identificación compuesto por las ecuaciones 4.39 y 4.42.

Una vez establecido el esquema de identificación, se comenzó con la etapa de simulación introduciendo al modelo del proceso las diferentes fallas una a una, como se propone en la tabla 4.1; encontrado cambios en parámetros físicos del sistema, como se muestra en las siguientes gráficas.

En las gráficas correspondientes a las áreas de los ductos el eje de las abscisas se halla en metros cuadrados, y en las gráficas del coeficiente de fricción, que se ha de tomar como constantes de proporcionalidad, el eje de las abscisas está en $\text{kg/m}^2\text{seg}$; para ambos casos el eje de las ordenadas que señala el tiempo del experimento se encuentra en segundos.

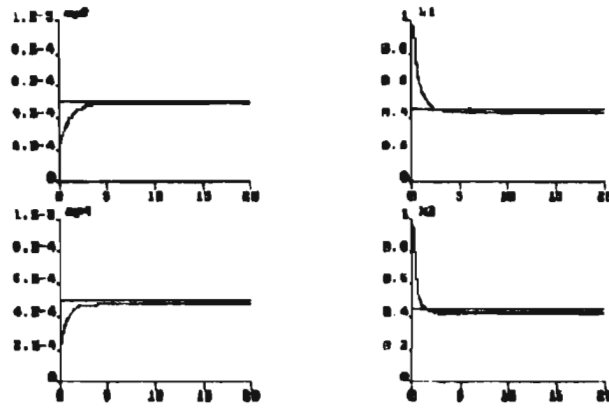


Figura 4.26 identificación de parámetros en circunstancias en que el equipo se halla en buenas condiciones

En la figura 4.26 se muestran los parámetros identificados para el sistema de tres tanques. Los valores obtenidos son muy semejantes a los que da el fabricante

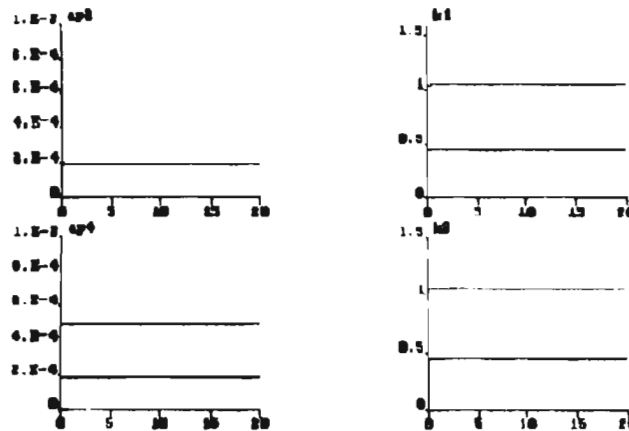


Figura 4.27 Parámetros identificados para el sistema de tres tanques ante un tapón entre el tanque 1 y el tanque 3

En la figura 4.27, se muestran los parámetros identificados cuando el sistema presenta una obstrucción entre el tanque uno y el tres. A de ponerse atención en ap_2 (el área de el respectivo ducto) pues este parámetro decrece como se esperaba

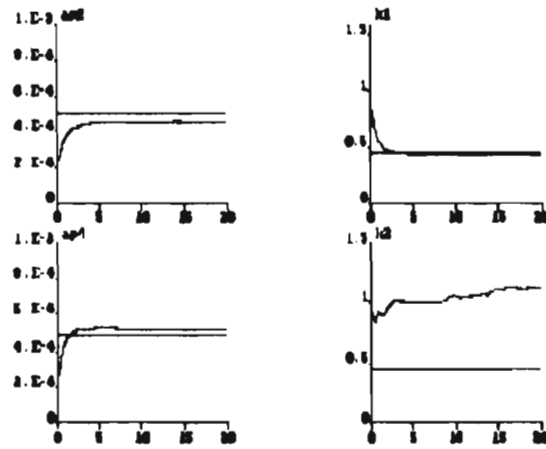


Figura 4.28 Parámetros identificados del sistema de tres tanques ante un error del sensor 2 del 70%

En la figura 4.28 se estudia una alteración al sensor 2 del 30%. En esta se encuentra un aumento en el coeficiente de fricción del ducto que une a los tanques 3 y 2

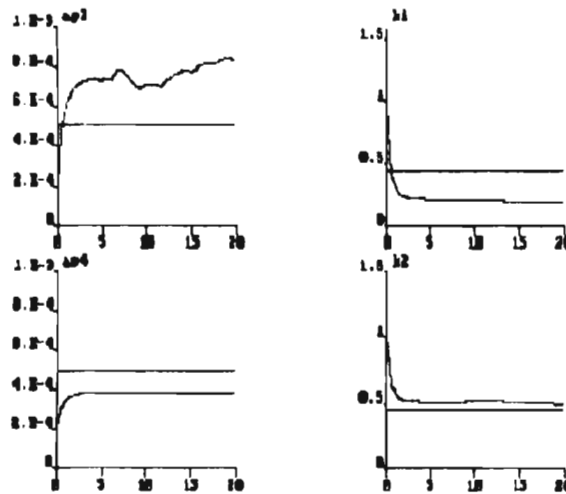


Figura 4.29 Parámetros identificados ante una fuga al tanque 3.

Cuando se somete el sistema a una fuga al tanque 3 como se muestra en la figura 4.29 En estas se ve cambios en todos los parámetros, pero se hace nota el aumento en el área que une a los tanques 1 y 3, así como el decremento en su coeficiente de fricción

Etapa experimental

En esta etapa, como primer paso se desarrollo una subrutina de Euler mejorado para integrar una serie de algoritmos gradiente que se proponen Isermann [18] establece que en la detección de fallas, se ha de identificar el modelo en tiempo continuo ya que de lo contrario se pierde información al hacer la transformación de continuo a discreto y luego volver a continuo para establecer la relación entre los parámetros identificados con los físicos

El procedimiento es totalmente igual al anterior, salvo que en vez de tomar las alturas para la ecuación 4.36 del modelo matemático, se utilizan las del equipo piloto. Las fallas se logran alterando al sistema, en las fallas de sensores, moviendo los potenciómetros asociados a los sensores de las alturas, para los tapones cerrando los válvulas de los ductos que unen a dos tanques o abriendo las válvulas que comunican a cada tanque con la cisterna, y que comúnmente se hallan cerradas, para provocar las fugas

En estas gráficas, el eje de las abscisa se halla en segundos y el de las ordenadas, primero para el área de ducto se halla en m^2 y el del coeficiente de fricción que se ha de tomar como una constante de proporcionalidad es de kg/m^2seg . Para este esquema se determino que el periodo de un ciclo de supresión es de 0.19 segundos.

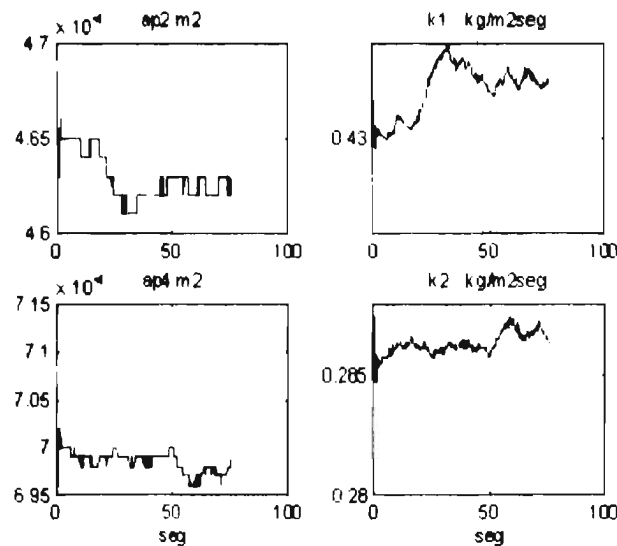


Figura 4.30 Evolución de los parámetros identificados para la detección de fallas en condiciones normales

En la figura 4.30 se muestra el comportamiento de los parámetros físicos que se hallaron al identificar la planta sin ninguna alteración

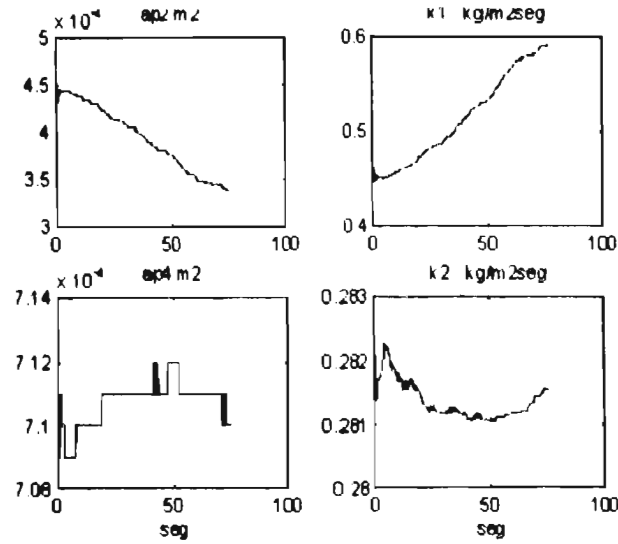


Figura 4.31 Evolución de los parámetros identificados para la detección de fallas en el caso de un tapón entre el tanque 1 y el tanque 3

En el caso del tapón entre tanque 1 y el tanque que se muestra en la figura 31 el área de este ducto tiende a disminuir mientras que su coeficiente de fricción tiende a aumentar, los otros parámetros también varían, pero no tan apreciablemente como los ya mencionados.

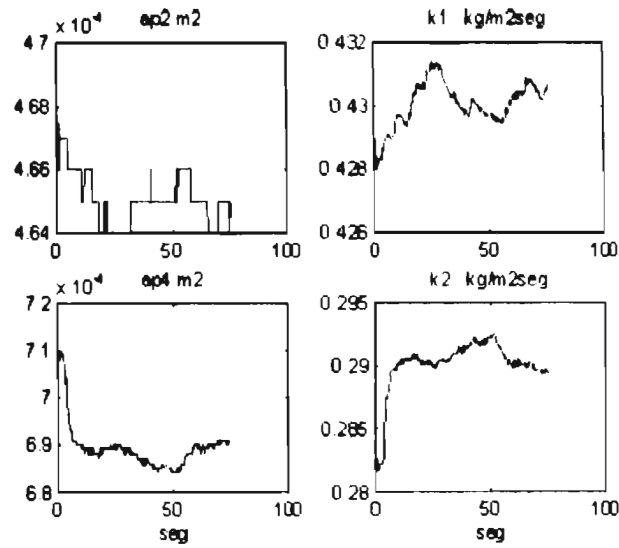


Figura 4.32 Evolución de los parámetros identificados en el caso de que el sensor 2 se halla al 70%

Cuando se hizo la prueba del sensor 2 al 70%, como lo muestra la figura 32, el área del ducto que une los tanques 3 y 2 disminuye a valores definidos, mientras que su coeficiente de fricción aumenta. A partir de estas variaciones es posible cuantificar la falla. El área del ducto que une a los tanques 1 y 3 aumenta, mientras que su fricción disminuye sin mucha importancia.

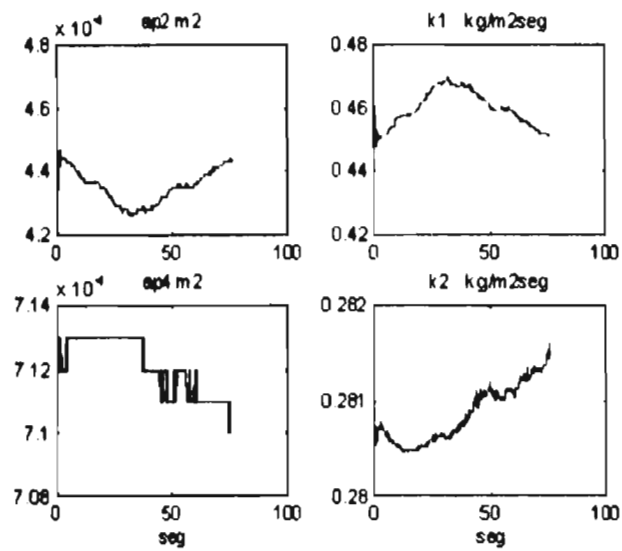
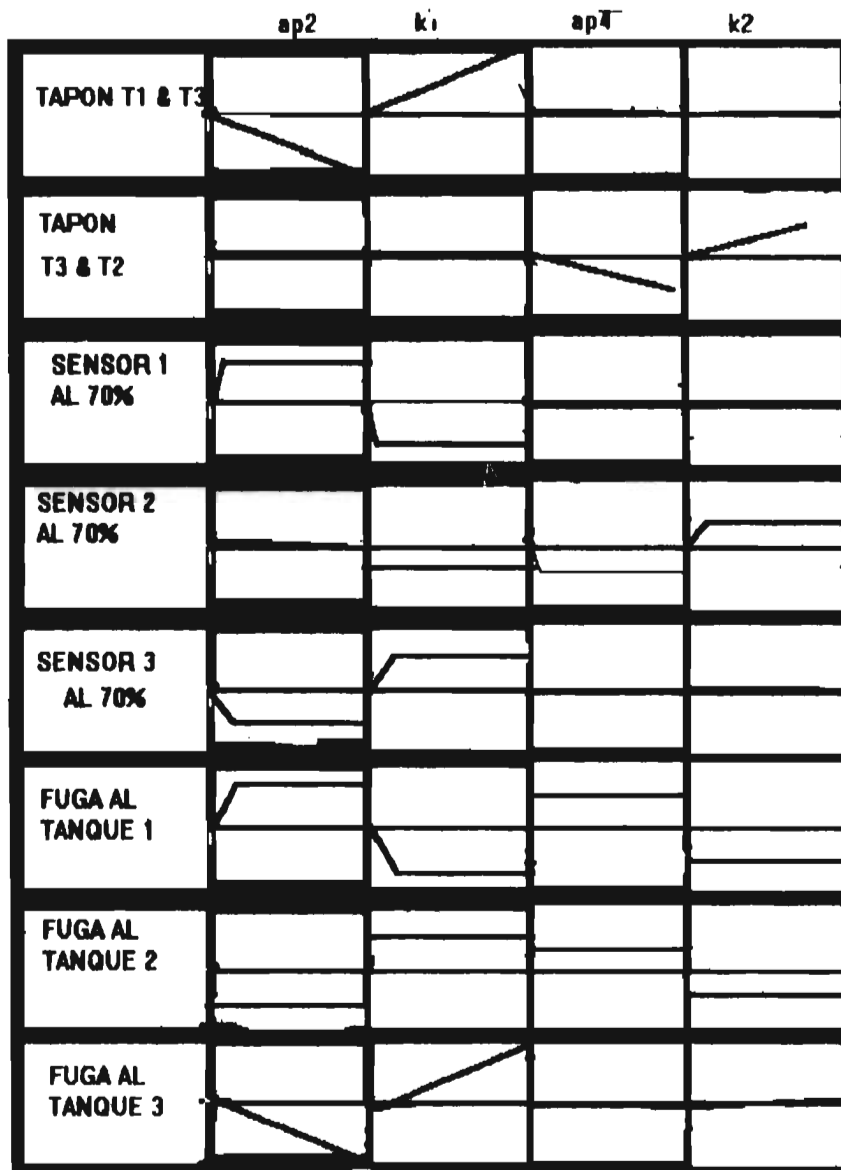


Figura 4-33 Evolución de los parámetros identificados en caso de una fuga al tanque 3.

Para el caso de la fuga en el tanque cuyas gráficas se dan en la figura 33 se tiene un decremento considerable en el área del ducto entre el tanque 1 y el tanque 3, así como un aumento también considerable en su fricción

4.3.2 LÓGICA PARA EL MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Tabla 4.7 Huellas de las diferentes fallas para el método de identificación de parámetros



Al igual que en los métodos anteriores, se estableció una lógica basada en la evolución de los parámetros identificados en presencia de fallas en el sistema

En este método para establecer los índices de falla, se definió un error o residuo de la siguiente forma:

$$e = \frac{\bar{a} - a}{\bar{a}} \quad 4.45$$

donde a es el parámetro identificado y \bar{a} su valor patrón. Esto se hace para establecer las tolerancias de cada parámetro, así como advertir cambios en estos. Aunque los valores estimados sin falla eran muy semejantes a los que da el fabricante, para diferentes experimentos nunca fueron los mismos, lo cual dificultaba fijar las cotas de los parámetros, por lo que se tomó como valor patrón de cada parámetro, al valor que presenta el sistema algún tiempo (bien especificado) después de comenzar a operar. Del modo antes descrito se establecen los siguientes índices de falla.

eap2	error del área promedio del ducto t1 & t3
ek1	error del coeficiente de fricción promedio del ducto t1 & t3
eap4	error del área promedio del ducto t3 & t2
ek2	error del coeficiente de fricción promedio del ducto t3 & t2

Las reglas que se encontraron se muestran en la tabla siguientes

Tabla 4.7 lógica empleada para la detección de fallas en el método de identificación de parámetros

fugas	fuga al tanque 1 if (eap2 > .001 && ek1 < .0001)	El área del ducto t1 & t3 aumenta debido a la fuga; disminuyendo el coeficiente de fricción de mismo
	fuga al tanque 2 if (eap4 < -2e-6 && ek2 > 2e-6)	Debido a que el agua en el ducto t3 & t2 disminuye el área de éste parece disminuir, mientras que el coeficiente de fricción aumenta
	fuga al tanque 3 if (eap2 < -.002 && ek1 > .001 && eap4 > .5e-6 && ek2 < -1e-7)	El flujo sale del tanque 1 por lo que se tiene un comportamiento similar a fuga al tanque 2, de igual manera como entra al tanque 2 se comporta igual que fuga al tanque 1
taponés	tapón en t1 & t3 if (eap2 < -.001 && ek1 > .001 && ek2 > 0)	El área del ducto t1 & t3 disminuye y aumenta la fricción al no poder fluir el agua. Al disminuir el flujo del agua, el coeficiente de fricción del ducto t3 & t2 aumenta

	tapón t3 & t2 fi(epa<-1e-7 && ek2>2e-6)	Disminuye el área de este ducto y aumenta su fricción
sensores	sensor 1 if(eap2> 006 && ek1<-003)	Para este caso aumenta el área del ducto t1 & t3, disminuyendo su fricción
	sensor 2 if(eap4<2e-6 && ek2>2.5e-6)	Aquí disminuye área del ducto t3 & t2, aumenta su fricción
	sensor 3 if(eap2<- 002 && ek1> 002 && eap4>-9e-7)	Disminuye el área del ducto t1 & t3, aumentado si coeficiente de fricción, igualmente aumenta el área del ducto t3 & t2.

4.3 CUANTIFICACIÓN DE FALLAS EN SENSORES

Por último, para poder cuantificar los errores en sensores se procedió de la siguiente forma: en primer lugar se cuidó de que en el sistema no se tuviera ninguna otra falla, para después ir alterando los potenciómetros de uno de los sensores, tomando datos para analizarlos y determinar el comportamiento de cada índice de falla ante esta perturbación. En este caso es de vital importancia cuidar lo antes mencionado, ya que en los dos casos anteriores se tenía idea de que el parámetro más afectado, sería el residuo relacionado al sensor que se estaba variando, pero en este caso no se sabía como evolucionarían los parámetros.

Al estudiar la falla de sensores alterando el potenciómetro 1 se encontró que el índice de falla que más se alteró fue eap2 (el área entre los tanques 1 y 3), su comportamiento se muestra en la figura 4.30

Los datos para el caso de error en el sensor 1 se muestran en la tabla 4.8

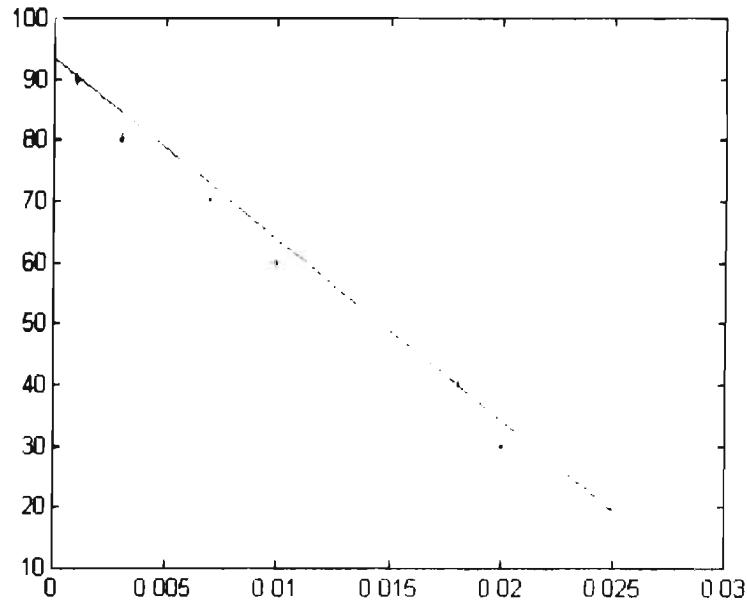


Figura 4.34 gráfica empleada para ajustar la falla en sensores en el método de identificación de parámetros

Tabla 4.8 datos encontrados al calibrar el error al sensor 1

eap2	Porcentaje
0.025	20
0.02	30
0.018	40
0.017	50
0.01	60
0.007	70
0.003	80
0.009	90
0.0	100

En la gráfica los puntos marcado por "*" son los datos experimentales, mientras que la línea continua se refiere a la curva ajustada. Esta curva teórica tiene la forma

$$\text{sensor1} = 2.6 \times 10^3 \text{ eap}_2 + 93.31$$

4.46

La cuantificación de los errores en los otros dos sensores se logra mediante las siguientes expresiones.

$$\text{sensor2} = -6.65 \times 10^4 \text{ ek}_2 + 75.052$$

$$\text{sensor3} = -1.923 \times 10^3 \text{ ek}_1 + 14.67$$

CAPITULO

5

COMPARACIÓN DE LOS ESQUEMAS DE DETECCIÓN DE FALLAS

Ya que se tienen todos los esquemas de detección de fallas, el siguiente paso consiste en probar y determinar cual de estos es más eficiente para la supervisión del sistema de tres tanques.

Para facilitar las pruebas se desarrolló un formato para presentar los resultados en la pantalla de la computadora. Éste se describe en la sección 5.1, el formato propuesto permite conocer el estado actual del sistema sin necesidad de tener un entrenamiento para entender los resultados. En esta sección también se presenta el diagrama de flujo del programa.

En la sección 5.2 se muestran los experimentos que se usaron para comparar la eficiencia de los esquemas de detección de fallas. Los experimentos tuvieron por objeto:

- Detectar errores en sensores
- Determinar la velocidad de respuesta
- Evaluar el comportamiento de los esquemas ante falsa alarma

5.1 ESCENARIO

El principal objeto de este trabajo, fue el de comparar esquemas de detección de fallas para supervisión en tiempo real del sistema de tres tanques, basados en tres metodologías distintas. Como los resultados que se tenían eran números y gráficas sólo entendibles para una persona entrenada, se buscó que la computadora realizará el análisis del proceso, y en caso de una falla el esquema la reconozca de una manera sencilla, clara y práctica, cumpliendo tanto con la tarea de señalar que hay un problema, como la de ubicarlo. Para lograr lo anterior se desarrolló la subrutina "Escenario" de la que se muestra un detalle a en la figura 5.1

void Escenario()

```

cprintf("xxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx");
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("x          x      x          x      x          x"),
cprintf("xxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx"),
cprintf("xxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx"),
cprintf("xxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx"),
cprintf("xxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx      xxxxxxxxxxxxxx"),
cprintf("xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx"),

```

Figura 5.1 Detalle de la subrutina Escenario

Esta subrutina presenta sobre la pantalla de la computadora un diagrama de los tanques (Figura 5.1), así como letreros propios de cada método. Esta subrutina se diseñó para ser usada en los tres métodos, pues aunque es necesario un programa para cada uno de los esquemas, las fallas a encontrar son las mismas. Por otro lado, los letreros antes mencionados son sólo los requeridos para interpretar los resultados de la etapa de supervisión (estos letreros dependen del método que se esté aplicando)

5.1.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA BASE

Considerando un programa que se denomina programa base, se implementaron los tres esquemas de detección de fallas. Este programa presenta cuatro opciones: la primera es arrancar bombas, que se usa para llevar al sistema a un punto de operación arbitrario; la segunda, leer alturas, que da el nivel de cada tanque en ese momento; una tercera fallas, en la que se realiza el lazo de supervisión, por último salir, con la que se termina la sesión de trabajo. A continuación se muestra el diagrama de flujo del programa base.

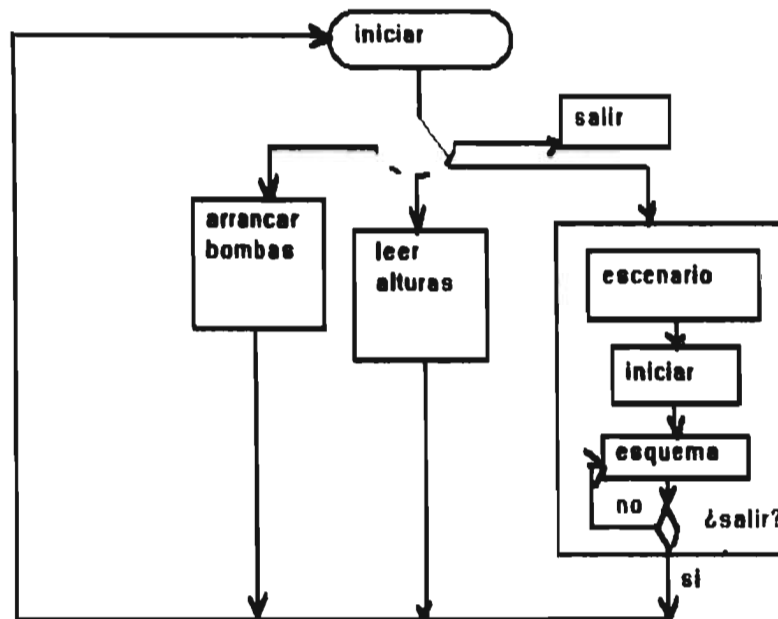


Figura 5.2 Diagrama de flujo usado para los esquemas de detección de fallas propuestos

En el módulo fallas, en primer lugar se ejecuta la subrutina "Escenario" la cual muestra en pantalla el dibujo del sistema, así como letreros propios del esquema de que se trate. Enseguida se inicializa el método. Con esto se arranca el lazo de detección de fallas, supervisando al sistema hasta que el usuario de por terminada la prueba. En este ciclo los resultados se muestran en la pantalla de la computadora, colocando en cada tanque del dibujo, sus datos correspondientes. La interpretación de la supervisión se facilita por los letreros de referencia. Al tener en pantalla el dibujo de los tanques, es posible también señalar la presencia de una falla de manera gráfica y sencilla, como a continuación se describe.

--En estos esquemas es posible ver si alguno de los tres sensores se halla en mal estado, dando una señal roja en la parte inferior izquierda del diagrama, que indica cual de los tres sensores está fallando, así como la magnitud de la falla

sensor x al y

Siendo $x=1,2,3$ y $0 < y < 80$

--Si por algún motivo se tapara uno de los ductos que une a dos de los tanque, en él se pondrá una letra O sobre el dibujo dentro del ducto obstruido, apareciendo al centro inferior del dibujo la frase en color amarillo.

Tapón entre x & y

$x = t1$ ó $t3$, $y = t3$ ó $t2$

--Cuando se presente una fuga sobre un determinado tanque, en la parte inferior del tanque se abrirá un orificio mostrando la fuga, y en el lado inferior derecha del dibujo aparecerá la leyenda:

fuga al tanque x

$x=1,2,3$ en color verde

5.2 PRUEBAS LLEVADAS A CABO PARA COMPARAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS TRES ESQUEMAS

Una vez que se tenían implementados los tres esquemas de supervisión, y que se habían corrido las pruebas necesarias con las que se demuestra la exactitud y confiabilidad de estos en particular, se procedió a compararlos con la finalidad de determinar cual de ellos es el más eficiente

Para esto, había que someter a los tres esquemas a una serie de pruebas en las mismas condiciones, seleccionando para ello los siguientes criterios

La capacidad de cuantificar fallas en los sensores

La velocidad de respuesta, que define como el tiempo que tarda entre la presencia de la falla y el momento en que el esquema la reporta, con lo cual se mide la sensibilidad de los esquemas

La presencia de falsa alarma, con la cual se mide la robustez de los esquemas

Esto se hizo a partir de los experimentos que se describen a continuación

Experimento I

Cuantificación de fallas en sensores


Para determinar la magnitud de error en sensores, se alteraron uno a uno, los potenciómetros que ajustan la lectura de las alturas a porcentajes conocidos, apuntando la magnitud que daba el esquema. Se examinaron los tres sensores para cada uno de los tres esquemas, situando los potenciómetros en las mismas posiciones obteniendo los siguientes resultados (tablas 5.1 a 5.3) En estas tablas, mediante  se indica que no se detectó la falla

Tabla 5.1 Método de modelos físicos



potenciómetro	sensor 1	sensor 2	sensor 3
80		79	
70	70	75	66
60	67	73	64
40	52	20	42

Tabla 5.2 Método de observadores

%	sensor 1	sensor 2	sensor 3
80	75	62	80
70	73	61	78
60	70	59	76
40	58	54	55

Tabla 5.3 Método de identificación de parámetros

%	sensor 1	sensor 2	sensor 3
80	81	//////////	77
70	73	74	68
60	68	64	59
40	44	47	43

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

De los resultados se tiene que sólo el método basado en observadores permite detectar los porcentajes altos es decir, los cambios más pequeños en los sensores. Por otro lado, aunque el sensor 2 en la identificación de parámetros no marca el error al 80%, los datos reportados son los más exactos. *Recuérdese que los potenciómetros afectan el valor de la lectura, si los potenciómetros se hallan al 100% no hay falla.*

Experimento II

Velocidad de respuesta

Para determinar la velocidad de respuesta se determina el tiempo que transcurre entre el instante que es introducida la falla, en el sistema y cuando el esquema de supervisión la reporta, mediante esta prueba se conocerá la sensibilidad de cada uno de los esquemas propuestos.

Ya que de una prueba no es posible sacar conclusiones, para este experimento se aplicó la falla 15 veces, y de estas se sacó su valor promedio, así como su desviación estándar, afin de realizar la interpretación de resultados como se muestra en la tabla 5.4.

Con tal de poder comparar con mayor claridad los tres esquemas, se midió la velocidad de todas las fallas que eran posible como a continuación se describe.

Tabla 5.4 Resultados de la velocidad de reacción (segundos)

FALLA	MODELOS F.	OBSERVADOR	I. PARÁM
TAPÓN T1 & T3	8±2.4	3.8 ±0.66	7.79 ± 1.95
TAPÓN T3 & T2	7.45±1.6	5.8±1.4	8.56±4.5
SENSOR 1	1.25±0	19±3.6	20.2±4.3
SENSOR 2	1.15±0.13	13.3±4.3	9.7±3.47
SENSOR 3	1.74±0.67	11.3±4.2	10.23±3.54
FUGA T1	5±.2	8.34±.6	11.3±1.6
FUGA T3	5±0	8.36 ±3.45	10.83 ± 5.77
FUGA T2	4.42±0.5	11.02 ± 5.73	14.06 ±3.876

OBSERVACIONES

Como se ve, el método de modelos físicos presenta la mayor velocidad de reacción y es la más estable, esto se debe a que en dicho método se comparan dos situaciones diferentes, mientras que en los otros se presentan dinámicas que retrasan la detección de fallas.

Experimento III

Falsas alarmas

El objeto del experimento III fue el de estudiar que tan probable era que en los esquemas se presentara falsa alarma, lo cual determinará la robustez de estos esquemas. Para ello se dejó evolucionar al sistema sin introducirle ninguna alteración, registrando cualquier alarma no esperada. Este experimento se dividió en varias etapas (en cada una se deja el tiempo indicado en la tabla 5.6) en estas se permite evolucionar al sistema sin introducirle ninguna alteración, anotando las fallas que se presenten (falsa alarma). Por último, para establecer que los sistemas se encontraban en buen estado, al concluir la última etapa, que era la de mayor duración, se introdujo una falla, tomando la velocidad de respuesta de ésta. Esto con el afán de demostrar que el no tener falsas alarmas no significaba que el esquema había dejado de funcionar.

En las primeras etapas se realizaron empleando el contador del esquema, y en las finales se usó el reloj para determinar el tiempo de prueba.

tabla 5.5 Resultados de los esquemas propuestos ante una falsa alarma

fase de la etapa	MODELOS FÍSICOS	OBSERVADORES	I. PARÁMETROS
Se observa el sistema de 50 a 250 (periodos de muestreo)	No hay falla	fuga al tanque 1	tapón t1 & t3
Corre el programa de 100 a 1000 pm	de 100 a 500 nada de 500 a 1000 sensor 1 al 81 %	de 100 a 500 tapón t1-t3 de 500 a 1000 No hay falla	100 a 500 nada de 500 a 100 tapón t1-t3
Se dejó al equipo durante 5 min. y se anoto lo que había en ese momento	sensor 1 al 79%	Mejoro mucho, el error más alto era del 3% no hay falla	fuga al tanque 2
Se volvió a dejar 5 min. y se apunto lo más importante	e1=-.12 e2=-.22 e3=-.39 no hay falla	e1=2% e2=4% e3=5% no hay falla	fuga al tanque 2 tapón t2 & t3
Se deja por 30 min. al equipo. para luego darle una fuga al t1	la detecto a los 40 pm no hay falla	la detecto a los 20 pm no hay falla	la detecto a los 100 pm y dio la falsa alarma fuga al tanque 3

OBSERVACIONES

Aquí se ve que entre más tiempo transcurre, el observador va mejorando hasta tener un porcentaje de error muy pequeño.

5.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en la sección anterior, se determinará cual de los tres métodos es el mejor, para esto, cada experimento fue analizando de modo diferente, mas al final se le dio el valor en base a su eficiencia, 1 al mejor, 2 al siguiente y 3 al menos eficiente. Después de todos los experimentos se reunieron los valores, para determinar con base a los siguientes criterios

- Cuantificación de falla
- Velocidad de respuesta
- Falsa alarma

cual de los métodos propuestos es el más conveniente para la detección de fallas en el sistema de tres tanques

Error en sensores

Para evaluar la cuantificación de error encontrado para cada esquema, a los valores obtenidos al variar los potenciómetros de los sensores, se les determinó su error. Este se obtiene de la diferencia de los valores del porcentaje introducido por el potenciómetro y el reportado (o cuantificado), dividida entre el valor del potenciómetro, o en forma matemática

$$e = \frac{(a' - a) \times 100}{a'} \quad 5.1$$

donde a' es el porcentaje de error en los potenciómetros y a el cuantificado por los esquemas. Los resultados obtenidos se aprecian en las siguientes tablas (5.6, 5.7, 5.8)

tabla 5.6 Método de modelos físicos

	sensor 1	sensor 2	sensor
80	-----	1 2	-----
70	0	7	5
60	10	20	6
40	33	50	5
promedio de promedio	14	19	5

tabla 5.7 Método de observadores

	sensor 1	sensor 2	sensor 3
80	6	22	0
70	4	5	1
60	16	1	26
40	45	3	37
promedio de promedio	17	14	24

tabla 5.8 Identificación de parámetros

	sensor 1	sensor 2	sensor 3
80	1	-----	3
70	4	5	2
60	13	6	1
40	1	17	7
promedio de promedio	7	9	3

En las tablas anteriores cuando apárese “-----” indica que no se detecto falla alguna, mientras que 0 significa que no hubo diferencia entre el valor reportado por el esquema y el valor del potenciómetro.

En la parte inferior de las tablas se dan los promedios de los errores por cada sensor. Aquí se tiene que los errores del método de observadores son los más altos y los promedios del método de identificación son menores que los del método basado en modelos físicos, por lo cual se determinó calificar los métodos de la siguiente manera.

Modelos físicos	2
Observadores	3
Identificación	1

Como conclusión se presenta que en el primer experimento, el método basado en identificación de parámetros (tabla 5.9) es el más eficiente ya que las cuantificaciones de error obtenidos son muy parecida a las introducidas por los potenciómetros. Para el caso del método basado en identificación de parámetros, el error normalizado asociado a cada sensor, es lineal con el porcentaje de los sensores, lo que facilita la cuantificación de la falla.

Velocidad de respuesta

En el experimento II, relacionado con la velocidad de respuesta, se le asignan valores a los métodos 1 al más rápido, 2 al siguiente y 3 al último. Posteriormente se suman las cantidades y el método con la menor suma será el más ágil.

tabla 5.9 Análisis de los resultados en las pruebas para determinar la velocidad de respuesta

FALLA	MODELOS F.	OBSERVADOR	I. PARÁM
TAPÓN T1 & T3	3	1	2
TAPÓN T3 & T2	2	1	3
SENSOR 1	1	2	3
SENSOR 2	1	3	2
SENSOR 3	1	3	2
FUGA T1	1	2	3
FUGA T3	1	2	3
FUGA T2	1	2	3
SUMA	11	16	21

Los resultados que se tienen son:

Modelos físicos	1
Observadores	2
identificación	3

Lo que muestra, que el método de modelos físicos tiene una velocidad de respuesta mayor que los otros dos. La razón de esto es debido a que tanto el método basado en identificación de parámetros, como el de observadores presentan una dinámica asociada a la evolución del esquema de estimación usado que retardan su velocidad de respuesta, lo cual no sucede en el de modelos físicos.

Falsas alarmas

Por último se evalúa la eficiencia de los esquemas ante falsa alarma. Para ello, a partir de la tabla 5.6, cada vez que los resultados son correctos, lo que se tendrá si no hay falsa alarma se le dará el valor de 0 y 1 en caso contrario.

tabla 5.10 Análisis para falsa alarma

PRUEBA	MODELOS FÍSICOS	OBSERVADORES	IDENTIFICACIÓN PARÁMETROS
Se observa el sistema de 50 a 250 (periodos de muestreo)	0	1	1
Corre el programa de 100 a 1000 pm	1	1	1
Se dejó al equipo durante 5 min. y se anoto lo que habia en ese momento	1	0	1
Se volvió a dejar 5 min. y se apunto lo más importante	0	0	1
Se deja por largo tiempo al equipo, para luego introducir una fuga al t1	0 falla reportada en 10 seg.	0 falla reportada en 5 seg.	1 falla reportada a 19 seg.
suma	2	2	5

Los resultados aquí obtenidos, son los siguientes:

Modelos fisicos	2
Observadores	1
Identificación	3

En las tablas (5.10 y 5.5) se verifica que en el método de observadores filtra las perturbaciones presentadas en él, logrando un menor número de falsa alarma.

Se hace notar que ninguno de los tres esquemas dejó de funcionar, pues en la última prueba, la falla que se introdujo fue detectada adecuadamente.

CAPÍTULO

6

CONCLUSIONES

Una vez que se ha establecido cada uno de los esquemas propuestos, y se han probado los tres esquemas ante diferentes situaciones, ya se está en condiciones de presentar los resultados finales de la presente tesis, los cuales se darán más adelante. Además de expresar algunas ideas que no se llevaron a cabo por diversas maneras.

6.1 CONCLUSIONES

En el capítulo anterior se presentaron tres experimentos para comparar los esquemas de supervisión, cuyos resultados se presentan de manera aislada, por lo que para poder hacer la comparación final, estos resultados son resumidos en la tabla 6.1

tabla 6.1 Resumen de las pruebas realizadas a los esquemas de detección de fallas

	Modelos fisico	Observadores	Identificación de parámetros
Pruebas a sensores	2	3	1
Velocidad de respuesta	1	2	3
Falsas alarmas	2	1	3
suma	5	6	7

En la tabla anterior se observa que, el método basado en modelos físicos a pesar de ser el más sencillo, resultó ser el más eficiente. Esto se explica porque en dicho método la salidas real, y la del modelo corren paralelas y cualquier diferencia entre éstas es rápidamente detectada. Lo que no sucede en los otros métodos, pues al ser modificado el proceso los observadores o la identificación de parámetros tienden a adecuarse a las nuevas circunstancias, lo que retrasa la velocidad de respuesta. Sin embargo la dinámica que se presenta en los observadores sirve para filtrar errores mejorando la detección de fallas. Seguramente cuando no se encuentre un buen modelo del proceso, el método basado en modelos físicos no funcionara.

De los tres métodos estudiados el método basado en observadores fue el que se estableció con más rapidez, encontrando las ganancias de los observadores sin ninguna dificultad.

En lo que se refiere al esquema que hace uso la identificación de parámetros uno de los problemas encontrados fue el modelo a identificar, dado que los principales parámetros a identificar se hallaban relacionados con variables no medibles.

Como conclusión final se tiene, que para el sistema de tres tanques estudiado no se encontró un modelo mejor o peor de detección de fallas. Como lo muestran sus resultados, ya que cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Por lo cual el uso de los tres en un sistema de supervisión sería lo más adecuado.

Para casos particulares en los cuales lo importante es la velocidad de respuesta, el esquema basado en modelos físicos sería el mejor. Así como para casos que se requiera gran confiabilidad en la medidas de los niveles, el método de identificación de parámetros será el más recomendable.

6.2 PERSPECTIVAS

A la par del desarrollo de este trabajo, se fueron presentando inquietudes en torno a éste, sin embargo, como se debía poner fin al trabajo no se pudieron abordar otros tópicos que sería interesante analizar. Entre otros destacaría en un terreno teórico los siguientes:

- 1.- Probar el método de Modelos Físicos con el modelo del fabricante.
- 2.- La detección de fallas mediante observadores de Kalman.
- 3.- Si la computadora lo permitiera, correr en paralelo los tres esquemas.
- 4.- Probar el uso de las redes Neuronales Como lo muestra Timo Sorsa y Hieikki N. Koivo en su artículo:
"Application of artificial neural Networks in process fault diagnosis"
Automatica vol. 29 No 4,843-849 ,1993

En cuanto a aplicaciones se refiere, sería interesante realizar las siguientes investigaciones

- 1.- En simulación alterar las dimensiones del equipo para ver su comportamiento en la detección de fallas.
- 2.- También en simulación variar el valor de la densidad del líquido para averiguar si es posible detectar la presencia de contaminantes.
- 3.- Tomar un sistema real, al cual se le pueda hacer un estudio estadístico para determinar que clase de fallas le afecta más y en base de éste determinar cuál es el método idóneo.

Estas inquietudes se dejan para futuros trabajos.

Antes de dar por terminado el presente trabajo, mediante el cual lograré alcanzar una de mis metas, doy gracias por lo tanto que recibí a varias personas cuya contribución fue fundamenta en la formación de mi persona...

MI madre

Crispina León

MI padre

Armando Cruz

Mis hermanos

Armando

Rocío Annir

Sandra Luz

Fausto Alberto

Federico Guillermo

Mis sobrinos

Martín Gerardo

Kristel Annals

Un especial reconocimiento a mis profesores

Víctor M. Ruiz

Tan Yu

Cristina Verde

Esau Vicente

Gerardo Espinosa

Sergio de Los Cobos

**Víctor García
Miguel Moctezuma
Gerardo Gerero
Fernando Lepe
Rogelio Alcantara**

A la Facultad de Física de la Universidad Veracruzana

**A La división de Estudios de Posgrado, de la Facultad de
Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México**

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- 1.- amira DTS200 Laboratory setup tree tank system (1993)
- 2.- Aström, K y B Wittenmark Adaptive Control Addison Wesley, USA (1990)
- 3.- Benjamin C. Ku. Sistemas automáticos de control Compañía Editorial Continental (1991)
- 4.- Dorf Richard Circuitos electronicos introducción al analisis y diseño, Editorial Alfaomega (1992)
- 5.- Donald Schilling y Charles Belove Circuitos electronicos Discretos e Integrados Editorial Mc Graw Hill (1993)
- 6.- Gerge F Simmons y Mc Graw Hill Ecuaciones diferenciales con Aplicaciones y Notas Historicas Mc Graw Hill (1977)
- 7.- Haliday D y Resnick Robert Fisica Compañía editorial Continental (1980)
- 8.- Karl Johan Åström and BojOm Wittenmark Adaptive Control, Addison Wesley Publishing Company (1989)
- 9.- Katsuhiko Ogata Dinámica de sistemas, Prentice-Hall hispanoamericana (1987)
- 10.- Katsuhiko Ogata Ingenieria de control moderno segunda edición, Prentice-Hall hispanoamericana (1993)
- 11.- Shankar Sastry y Mark Bodson Adaptive Control Stability Convergence and Robutsnes Prentice-Hall, Englewood Clif, USA (1987)
- 12.- Tsong Chi Chen Introduction to syste teory Now York Holt Rinehart W
- 13.- Vidyasagar, M Nonlinear system Analysis Prentice- Hall, Englewood Cliffs, N j 1978
- 14.- Ya S Bugruv y S M Nikoike Matemáticas superiores Editorial Mir, Moscu USSR (1985)

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- 1 - amira DTS200 Laboratory setup tree tank system (1993)
- 2 - Aström, K y B Wittenmark. Adaptive Control. Addison Wesley, USA (1990)
- 3 - Benjamin C. Ku. Sistemas automáticos de control Compañía Editorial Continental (1991)
- 4 - Dorf Richard. Circuitos electrónicos introducción al análisis y diseño, Editorial Alfaomega (1992)
- 5 - Donald Schilling y Charles Belove. Circuitos electrónicos Discretos e Integrados. Editorial Mc Graw Hill (1993)
- 6 - Gerge F. Simmons y Mc Graw Hill. Ecuaciones diferenciales con Aplicaciones y Notas Históricas Mc Graw Hill (1977)
- 7 - Haliday D. y Resnick Robert. Física Compañía editorial Continental (1980)
- 8 - Karl Johan Åström and Björn Wittenmark. Adaptive Control, Addison Wesley Publishing Company (1989)
- 9 - Katsuhiko Ogata. Dinámica de sistemas, Prentice-Hall hispanoamericana (1987)
- 10 - Katsuhiko Ogata. Ingeniería de control moderno segunda edición, Prentice-Hall hispanoamericana (1993)
- 11 - Shankar Sastry y Mark Bodson Adaptive Control Stability Convergence and Robustness Prentice-Hall, Englewood Clif, USA. (1987)
- 12 - Tsong Chi Chen. Introduction to system theory Now York Holt Rinehart W.
- 13 - Vidyasagar, M. Nonlinear system Analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1978
- 14 - Ya S. Bugruv y S. M. Nikolke. Matemáticas superiores Editorial Mir, Moscú USSR (1985)

PUBLICACIONES

- 15.- B. A. Brandin y W. M. Wanhan. Supervisory control of discrete event systems *Automatic Control* Vol 39 No 2 Febrero (1994)
- 16.- Chen J. Optimal Unknown input distribution matrix selection in robust fault diagnosis *Automatica* 29,4,837-841 (1983)
- 17.- Cofep Darred D. and K. Garg Supervisory control of real time discrete event system using lattice theory, I.E.E.E, *Automatic Control* Vol 41 No2 Febrero 1996
- 18.- François Jean M. y Philippe Mouyoun On residual generation by observer and parity space approaches *Automatic Control* vol 39 No 2 Febrero 1994
- 19.- François Jean Magni On continuous time parameter identification by using observer *Automatic Control* vol 40 No 10 1995
- 20.- Frank Pault M. Fault diagnosis in dynamic system using analytic and knowledge-based redundancy A survey and some new results. IFAC/MAC/FORT International Symposium on Advanced Information Processing in Automatic Control, Nancy France Julio 1990
- 21.- Gertir Janos J. Survey of model based failure detection and isolation in complex plants, *IEEE Control System Magazine*, Diciembre 1988
- 22.- Giannakis Gergios B. Polyspectral and cyclostationary approaches for identification of close-loop systems. I.E.E.E, *Automatic Control* Vol 40 No 5 Mayo 1995
- 23.- Gustaffsson Federik The marginalized likelihood ratio test for detecting abrupt change I.E.E.E, *Automatic Control* Vol 40 No 1 Enero 1996
- 24.- Isermann Rolf Process detection based on modelling and estimation, *Automatica* 20,4,387-404 (1983)
- 25.- Isermann Rolf Fault diagnosis of fluid processes based on process model knowledge Interfluid 1st International Congress on fluid Handling Systems 10-14 September 1990,

- 26.- Isermann Rolf. Fault diagnosis of machine via parameter estimation and knowledge processing Tutorial paper *Automatica*, 20, pp, 815-835 (1993)
- 27.- Kokotovic P.P. y Morse A. S Adaptive output-feedback control system with output nonlinearities, IEEE Transaction Automatic Control vol. 37 No., Noviembre 1992
- 28.- Kumar Ratnesh y Lawrence E. Holway Supervisory control of deterministic petri net with regular specification languages, I.E.E.E, t. Automatic Control Vo 41 No 2 Febrero 1996
- 29.- Li Yong y W.M. Wonham. Control of vector discrete event system II I.E.E.E.T Automatic Control Vol 29 No 3 Marzo 1994
- 30.- Liberopoulos G. y M. Caramanes. Dynamic and design of a class of parameterized manufacturing flow control I.E.E.E, Automatic Control Vol 40 No 6 Junio 1995
- 31.- Milchka Hannah y David Mayne. Moving horizon observers and observer control I.E.E.E, t. Automatic Control Vol 40 No 6 Junio 1995
- 32.- P. Kosac y W. M. Wonham Fulli decentralized solution of supervisory control I.E.E.E, t. Automatic Control Vol 40 No 10 Diciembre 1995
- 33.- Quiag Jian y Dong Xiang. Structural properties of optimal production controllers in failure prone manufacturing system I.E.E.E, t. Automatic Control Vol 39 No 3 Marzo 1994
- 34.- Sorse Timo y Heikki N. Koivo. Application of artificial neural in process fault diagnosis, *Automatica* vol 29 No 4 1993
- 35.- Veres S. M y Norton. Predictive self-tuning control bounding and worst-case design *Automatica* Vol 29 No 4 ,911-928 (1993)
- 36.- Wigren Torbjörn. Recursive predictor error identification using non-linear wiener model, *Automatica* vol. 29, No 4 1011-1025 (1993)