

## Detección de fallas en un sistema de tres tanques interactivos

### Fault detection in an interacting level systems with three tanks

LADRON DE GUEVARA-RODRIGUEZ, Víctor Manuel†\*, RAMÍREZ-CABRERA, Luis Alejandro, ZUÑIGA-CASTILLO, Manuel Alejandro y ROMERO-GALVÁN, Gerardo

*Universidad Autónoma de Tamaulipas*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Víctor Manuel, Ladron de Guevara-Rodriguez / CVU CONACYT ID: 715044*

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Luis Alejandro, Ramírez-Cabrera / CVU CONACYT ID: 492861*

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Manuel Alejandro, Zuñiga-Castillo / CVU CONACYT ID: 492852*

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Gerardo, Romero-Galván / CVU CONACYT ID: 201366*

Recibido: Marzo 30, 2018; Aceptado: Junio 09, 2018.

#### Resumen

El diagnóstico de fallas en los sistemas es un tema que sigue siendo retador para los grupos de investigación. En este artículo se propone un algoritmo para la detección de fallas en un sistema de nivel, el cual está conformado por tres tanques interconectados entre sí, formando un sistema interactivo. Con el propósito de extender los resultados obtenidos en simulación, se desarrolló el sistema físico, con el fin de validar los resultados. El método considera un enfoque basado en observadores que facilitan el diseño de los generadores de residuos. Primeramente, siguiendo un enfoque clásico, el sistema original es desacoplado en diferentes subsistemas, de tal modo que cada subsistema sea sensible solamente a una falla en particular. Posteriormente, los residuos se generan a partir de un banco de observadores, correspondiendo un observador distinto para cada uno de los subsistemas desacoplados. Se presentan los resultados numéricos basados en simulaciones para el sistema de tres tanques, contemplando la presencia de fallas tanto en sensores como en actuadores. Finalmente, con el propósito de corroborar los resultados obtenidos en simulaciones, se presentan los resultados obtenidos en pruebas experimentales realizadas en el sistema físico real.

#### Detección de fallas, Observadores, Sistema de Nivel

#### Abstract

This paper proposes an algorithm for fault detection in an interacting level system considering three tanks. In order to extend the results obtained in simulation, the physical system was developed to validate those results. The method considers an observer-based approach that facilitates the design of residual generators. First, following a classical approach, the original system is decoupled in different subsystems, in such a way that each subsystem is sensitive only to one particular failure. Subsequently, the residuals are generated from an observers bank, where a different observer corresponding to each of the decoupled subsystems. Finally, in order to corroborate the results obtained in simulations, several experiments were developed with the real physical system. Where the system is conformed by three tanks where they have ten liters of capacity, two water pump who perform the function of actuators and sensors of level and flow. It is important to note that the faults are presented in sensors and actuators.

#### Faults Detection, Observers, Level System

**Citación:** LADRON DE GUEVARA-RODRIGUEZ, Victor Manuel, RAMIREZ-CABRERA, Luis Alejandro, ZUÑIGA-CASTILLO, Manuel Alejandro y ROMERO-GALVAN, Gerardo. Detección de fallas en un sistema de tres tanques interactivos. Revista de Tecnologías Computacionales. 2018, 2-6: 29-38.

\* Correspondencia del Autor (Correo Electrónico: [czam\\_@hotmail.com](mailto:czam_@hotmail.com))

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El diagnóstico de fallas en sistemas, representa una parte importante del estudio en la actualidad, la detección oportuna de la presencia de fallas en los procesos industriales permite tomar acciones de corrección con el objetivo de que estos operen de manera continua y segura. En las últimas décadas muchas investigaciones relacionadas con el problema de diagnóstico de fallas han sido reportados (Alcorta y Frank, 1997), (Frank y Ding, 1977), (Massoumnia et al., 1989), (Rodríguez y Alcorta-García, 2015).

El presente trabajo considera el desarrollo de una plataforma experimental de tres tanques benchmark con dos bombas. Esta plataforma nos permitirá poner a prueba el algoritmo para la detección y aislamiento de fallas en el sistema físico. Es importante mencionar que se consideran fallas tanto en sensores como en actuadores, y se desarrolla un esquema que permite el diagnóstico preciso de cada una de las fallas presente.

En la literatura existen diferentes métodos basados en observadores para el diagnóstico de fallas (Duan y Patton, 2001), (Venkatasubramanian et al., 2003), (Massoumnia, 1986) y (Ding y Frank, 1994).

Una manera de realizar el diseño de un algoritmo para el diagnóstico de fallas es en base a observadores basados en la retroalimentación de la salida, o parte del estado, con el fin de estimar el estado completo, los cuales obtienen señales que dependen explícitamente de la existencia de tales fallas.

De esta manera, las señales producidas son evaluadas con respecto a un umbral, y así determinar la presencia de fallas.

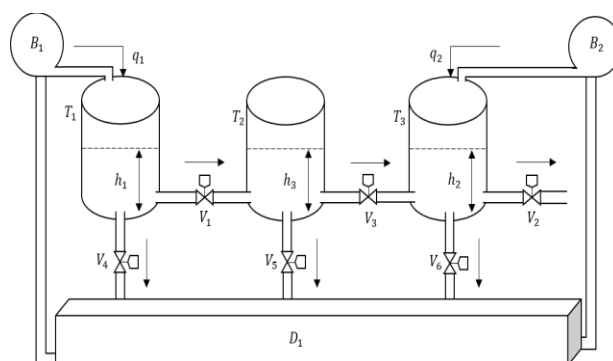
## Plataforma experimental del sistema de nivel

La plataforma experimental consiste en un sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output) no lineal. El sistema este constituido por tres tanques cilíndricos de superficie transversal T1, T2 y T3, los cuales están interconectados entre sí por un sistema de tuberías y válvulas: la válvula V1 entre T1 y T3, la válvula V2 entre T3 y T2 y la válvula V3 entre T2 y la salida del sistema, estas válvulas simulan las obstrucciones de las tuberías.

La válvula V4 entre el tanque T1 y el exterior, la válvula V5 entre el T3 y el exterior y la válvula V6 entre T2 y el exterior simulan una fuga en los tanques.

Las variables medibles del sistema son los niveles de los tres tanques  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$ , y los flujos  $q_1$  y  $q_2$  que corresponden al flujo originado por las bombas.

La plataforma es un sistema cerrado, donde el líquido que sale por las válvulas V2, V4, V5 y V6 llega a un depósito D1 colocado en la parte inferior, de donde retorna a los tanques principales a través del sistema de tuberías interconectadas con las bombas B1 y B2. Una descripción detallada puede ser encontrada en (Ding, 2008). La figura 1 muestra el esquema de la plataforma experimental.



**Figura 1** Esquema plataforma experimental

Fuente: Elaboración propia

## Modelo matemático de la plataforma

El modelo no lineal se obtiene aplicando directamente las leyes de Torricelli, tomando en cuenta los flujos de entrada y salida de cada tanque. Partiendo del modelo matemático del sistema de tres tanques representado por las siguientes ecuaciones diferenciales (Ding, 2008).

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{A} \left[ q_1 - C_1 S_{13} S_g (h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|} \right] \quad (1)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{A} \left[ q_2 + C_3 S_{23} S_g (h_3 - h_2) \sqrt{2g|h_3 - h_2|} - C_2 S_2 \sqrt{2gh_2} \right] \quad (2)$$

$$\dot{h}_3 = \frac{1}{A} \left[ C_1 S_{13} S_g (h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|} - C_3 S_{23} S_g (h_3 - h_2) \sqrt{2g|h_3 - h_2|} \right] \quad (3)$$

Después de la linealización en los puntos de operación  $h_1 = 45 \text{ cm}$ ,  $h_2 = 15 \text{ cm}$  y  $h_3 = 30 \text{ cm}$ , tenemos un modelo lineal (nominal).

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

$$y = Cx \quad (5)$$

Donde

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T \quad (6)$$

$$u = [q_1 \ q_2]^T \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.02 & 0 & 0.02 \\ 0 & -0.0458 & 0.0196 \\ 0.02 & 0.0196 & -0.0396 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.006 & 0 \\ 0 & 0.006 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde los parámetros son:

Símbolo	Descripción
$h_i$	Nivel del líquido en el tanque en $\text{cm}$
$A$	Área del tanque en $\text{cm}^2$
$S$	Sección entre los tubos de interconexión en $\text{cm}^2$
$q_{13}$	Flujo del tanque 1 al tanque 3 en $\text{cm}^3/\text{s}$
$q_{32}$	Flujo del tanque 3 al tanque 2 en $\text{cm}^3/\text{s}$
$q_{20}$	Flujo de salida en $\text{cm}^3/\text{s}$
$q_i$	Flujo de entrada a los tanques en $\text{cm}^3/\text{s}$
$C_i$	Coficiente de flujo de salida

**Tabla 1** Especificaciones

Fuente: Elaboración propia

## Modelado de fallas

Considerando las siguientes fallas.

Las fugas en los tanques  $f_{f1}$ ,  $f_{f2}$ ,  $f_{f3}$ , pueden ser modelados como adiciones a la salida de los tanques, donde.

$$\theta_{A1} \sqrt{2gh_1}; \theta_{A2} \sqrt{2gh_2}; \theta_{A3} \sqrt{2gh_3} \quad (11)$$

$$\theta_{Ai} = Z_i \quad (12)$$

Donde  $\theta_{A1}$ ,  $\theta_{A2}$ ,  $\theta_{A3}$  son conocidas y dependen del tamaño de la fuga  $Z_i$  (área de la fuga).

La obstrucción entre el flujo de los tanques (T1 y T3, T3 y T2) y el tanque T2 y la salida, representadas por  $f_{o13}$ ,  $f_{o20}$ ,  $f_{o32}$  son modeladas por:

Entre T1 y T3

$$\alpha_1 C_1 S_{13} S_g (h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|} \quad (13)$$

Entre T3 y T2

$$\alpha_3 C_3 S_{23} S_g (h_3 - h_2) \sqrt{2g|h_3 - h_2|} \quad (14)$$

Entre T2 y la salida

$$\alpha_2 C_2 S_g \sqrt{2gh_2} \quad (15)$$

$$0 \leq \alpha_i < 1$$

Las fallas en actuadores son las fallas presentes en las bombas, representadas por  $f_{a1}$  y  $f_{a2}$ , son modeladas por:

$$q_1(1 - \beta_1) \quad 0 \leq \beta_1 < 1 \quad (16)$$

$$q_2(1 - \beta_2) \quad 0 \leq \beta_2 < 1 \quad (17)$$

Las fallas en sensores, pueden ser representadas como adiciones a los tres sensores, denotados por  $f_{s1}$ ,  $f_{s2}$ ,  $f_{s3}$ :

$$y = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} + I_{3 \times 3} \begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \\ f_{s3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Estas fallas son modeladas como:

$$\dot{x} = Ax + Bu + E_f f \quad (19)$$

$$y = Cx + F_f f_s$$

Donde

$$E_f = \begin{bmatrix} -2.27 & 0 & 0 & -0.3 & 0 & 0 & 0.006 & 0 \\ 0 & -1.3 & 0 & 0 & 0.39 & 0.29 & 0 & 0.006 \\ 0 & 0 & 1.84 & 0.3 & 0 & -0.29 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$F_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$f = [f_{f1} \ f_{f2} \ f_{f3} \ f_{o13} \ f_{o20} \ f_{o32} \ f_{A1} \ f_{A2}]^T \quad (22)$$

$$f_s = [f_{s1} \quad f_{s2} \quad f_{s3}]^T \quad (23)$$

## Construcción de los residuos basados en observadores

### 1 Observadores no lineales

Cuando el proceso se describe por un modelo no lineal y solamente se desea resolver el problema de detección y no existen perturbaciones ni fallas de no interés, se pueden utilizar diferentes técnicas para ajustar la ganancia del observador, dependiendo de la clase de funciones no lineales involucradas. El camino sencillo consiste en linealizar la ecuación diferencial del error de estimación y seleccionar la ganancia del observador que garantice estabilidad del error en condiciones normales (Verde et al., 2013).

Los observadores propuestos por Luenberger (1964), son algoritmos que reconstruyen las variables de estado no disponibles de un sistema, a partir de su modelo y el conocimiento del vector de entradas  $u(t)$  y del vector de salidas  $y(t)$ . En tareas de control se usan directamente acoplados a los algoritmos de control en lazo cerrado. Actualmente la variedad de tipos de observadores para ciertas clases de sistemas no lineales es muy amplia (Nijmeijer y Fossen, 1999; Besancon et al., 2007).

### 2 Construcción de los residuos

La construcción de los residuos se basa en el desacoplo del sistema nominal en subsistemas sensibles a  $n$  fallas. Posterior a esto, se diseñó un observador para cada subsistema, de tal manera que el observador utilice las salidas y entradas correspondientes a la falla que se desea aislar, así, el observador diseñado es sensible solo a las fallas en algún sensor determinado, actuador, u otro elemento a considerar con falla, obteniendo así, una matriz de firmas de fallas para el sistema, el cual nos indicara que fallas son probablemente las que ocurrieron.

Subsistema 1

$$\begin{aligned} \dot{h}_1 &= A_1 h_1 + B_1 u_1 + G_1 y_3 + E_{1f} f \\ y_1 &= C h_1 + F_{f1} f_s \end{aligned} \quad (24)$$

Donde

$$\begin{aligned} A_1 &= [0.02] \quad B_1 = [0.006] \\ G_1 &= [0.02] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} E_{1f} &= [-2.27 \quad 0 \quad 0 \quad -0.3 \quad 0 \quad 0 \quad 0.006 \quad 0] \\ C &= [1] \quad F_{f1} = [1 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (26)$$

Los subsistemas 2 y 3 fueron desacoplados utilizando el mismo procedimiento. Los subsistemas 4, 5 y 6 son combinaciones de los subsistemas 1, 2 y 3, que representan los tres estados del sistema. Por ejemplo, el subsistema 5 es una combinación de los subsistemas 1 y 3, una relación de ambos.

Subsistema 5

$$\begin{aligned} \dot{h}_{1,3} &= A_5 h_{1,3} + B_5 u_1 + G_5 y_2 + E_{5f} f \\ y_5 &= C h_{1,3} + F_{f5} f_s \end{aligned} \quad (27)$$

Donde

$$\begin{aligned} A_5 &= \begin{bmatrix} -0.02 & 0.02 \\ 0.02 & -0.0396 \end{bmatrix} \\ B_5 &= \begin{bmatrix} 0.006 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} G_5 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0196 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad h_{1,3} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_3 \end{bmatrix} \\ E_{5f} &= \begin{bmatrix} -2.27 & 0 & 0 & -0.3 & 0 & 0 & 0.006 & 0 \\ 0 & 0 & 1.84 & 0.3 & 0 & -0.29 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (29)$$

$$F_{f1} = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Los residuos son el resultado de la diferencia de los estados del sistema donde ocurren las fallas y los estados estimados a partir de un banco de observadores.

Observador 1

$$\begin{aligned} \dot{\hat{h}}_1 &= A_1 \hat{h}_1 + B_1 u_1 + G_1 y_3 + L_1 (y_1 - C_1 \hat{h}_1) \\ \hat{y}_1 &= C_1 \hat{h}_1 \end{aligned} \quad (30)$$

El generador de residuos resulta:

$$r_1 = y_1 - C_1 \hat{h}_1 \quad (31)$$

La activación de cada uno de los residuos construidos dependerá de la ocurrencia de las fallas, cada residuo es sensible a ciertas fallas debido al desacoplo.

De acuerdo a los observadores de cada subsistema se obtienen 5 residuos, ya que el residuo número 4 que corresponde la relación de 1 y 2 no aporta información adicional al análisis y diagnóstico de las fallas, pues este residuo se activa con las mismas fallas que activan el residuo 3. A continuación se presenta la tabla de firmas de los residuos.

residuos fallas	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_5$	$r_6$
$f_{f1}$	✓			✓	
$f_{f2}$		✓			✓
$f_{f3}$			✓	✓	✓
$f_{o13}$	✓		✓	✓	✓
$f_{o20}$		✓			✓
$f_{o32}$		✓	✓	✓	✓
$f_{A1}$	✓			✓	
$f_{A2}$		✓			✓
$f_{s1}$	✓		✓	✓	✓
$f_{s2}$		✓	✓	✓	
$f_{s3}$	✓	✓	✓		✓

**Tabla 2** Tabla de firmas

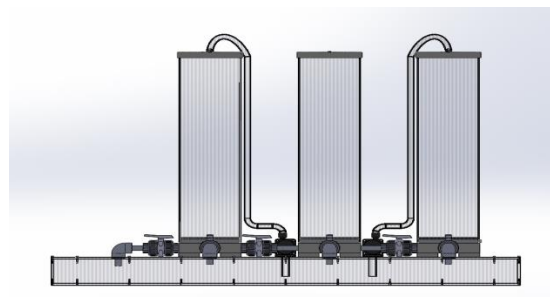
Fuente: Elaboración propia

## Desarrollo de la plataforma experimental

Para el desarrollo de la plataforma experimental, se dividió en dos partes. La primera parte comprende el diseño de los tres tanques y el depósito principal, así como la instalación de los sensores y actuadores. La segunda comprende la parte computacional y el desarrollo del algoritmo para la detección de fallas.

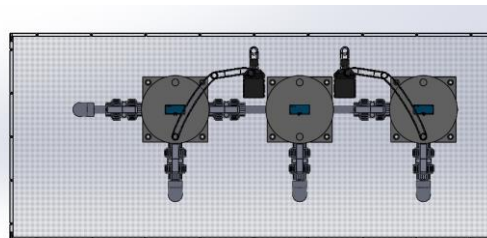
### 1 Construcción de la plataforma

Para la construcción de la plataforma se diseñó un modelo elaborado en Solidwork, el cual sirvió de guía para calcular las dimensiones, materiales y costos. En las figuras 2a, 2b, 2c se muestra el diseño propuesto para la plataforma.



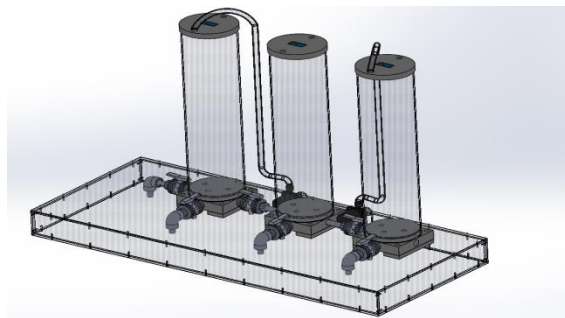
**Figura 2a** Vista frontal

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2b** Vista superior

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2c** Vista isométrica

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido el diseño final se procedió a la construcción de la plataforma. A continuación, se muestra las especificaciones técnicas del sistema físico.

Pieza	Especificación
Tanques T1, T2 y T3.	Altura 55 cm. Diámetro: 14.5cm. Capacidad: 9.1 Litros c/u.
Deposito D1.	Volumen 47 cm x 113 cm x 7.6 cm. Capacidad de 40.3 litros.
Bombas B1 y B2.	Capacidad de flujo 800L/h.
Válvulas V1, V2, V3, V4, V5, V6.	Diámetro ½ pulgada.
Material de fabricación.	Tanques de Lexan. Base de tanques y válvulas de PVC.

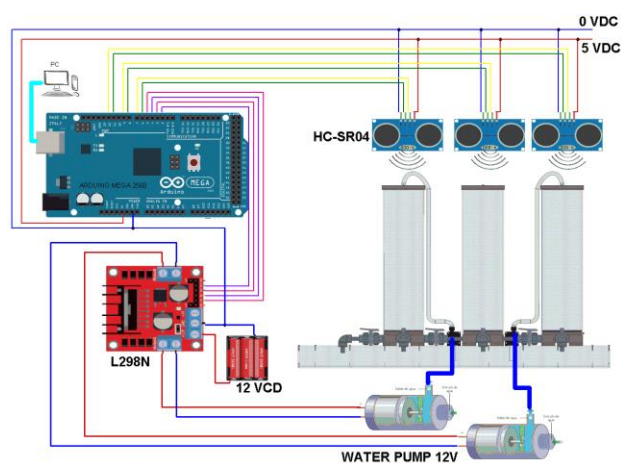
**Tabla 3** Especificaciones técnicas

Fuente: Elaboración propia

### 2 Sensores y actuadores

Para la comunicación entre la plataforma experimental y la parte del algoritmo para la detección de fallas, se emplearon diferentes herramientas. La placa Arduino Mega 2560, es un microcontrolador el cual cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida y 16 entradas analógicas, entre otras características.

Con el fin de facilitar la medición de las variables del proceso y del control de los actuadores. Para el censado del nivel en los tres tanques, se hizo uso del sensor ultrasónico HC-SR04, el cual, al emitir un sonido ultrasónico por uno de sus transductores y esperar que el sonido rebote en el agua, el eco es captado por el segundo transductor, la distancia es proporcional al tiempo de demora en llegar la señal, con ello se mide a que nivel del tanque se encuentra el líquido. Como actuadores se utilizaron dos bombas con capacidad de flujo de 800 L/h, funcionando con 12 vdc a 19 W, utilizando un módulo L298N para la regulación de la potencia. La figura 3 muestra un diagrama esquemático del sistema.

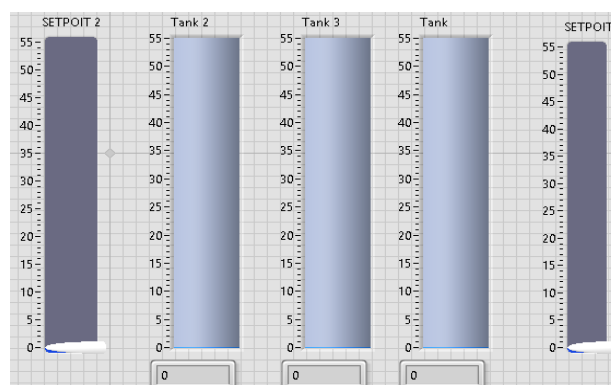


**Figura 3** Diagrama esquemático  
Fuente: Elaboración propia

### 3 Parte computacional

Se utilizó LabVIEW en el desarrollo del algoritmo para la detección de fallas en el sistema físico, el cual ofrece un enfoque de programación gráfico que ayuda a la visualización del panel de control principal desde donde es posible llevar a cabo el monitoreo de las variables del sistema, así como la simulación de las fallas en la plataforma experimental.

Las figuras 4a y 4b muestran el panel frontal de control, el cual es usado para la comunicación entre el operario y la plataforma experimental.

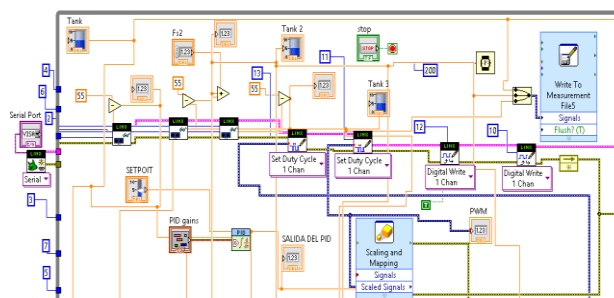


**Figura 4a** Panel frontal superior de control  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4b** Panel frontal inferior de control  
Fuente: Elaboración propia

La figura 5 muestra la programación a bloques de este.



**Figura 5** Programación a bloques  
Fuente: Elaboración propia

### Simulación

Obtenido el modelo matemático en espacio de estados se realizó la simulación del algoritmo en la plataforma MATLAB.

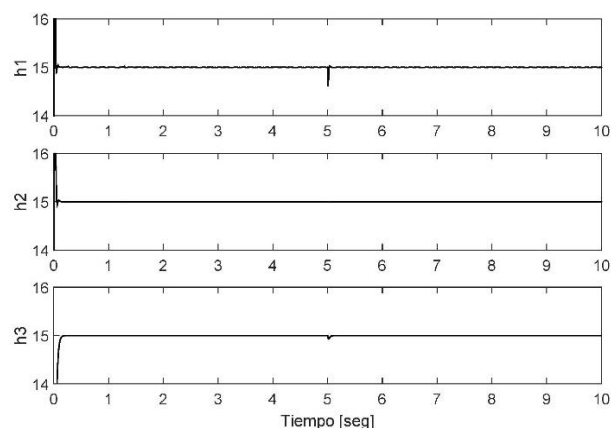
Partiendo de que el sistema se encuentra en lazo cerrado y que solo una falla se puede presentar a la vez se realizó la simulación de algunas fallas en el sistema.

#### 1 Primera Simulación: Fuga en tanque 1 ( $Ff_1$ )

La primera simulación contempla la presencia de la falla  $Ff_1$ , la cual consiste en la fuga en el tanque número uno.

LADRON DE GUEVARA-RODRIGUEZ, Victor Manuel, RAMIREZ-CABRERA, Luis Alejandro, ZUÑIGA-CASTILLO, Manuel Alejandro y ROMERO-GALVAN, Gerardo. Detección de fallas en un sistema de tres tanques interactivos. Revista de Tecnologías Computacionales. 2018

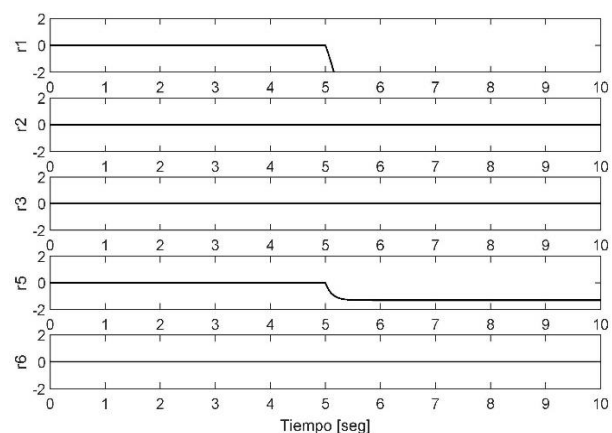
La figura 6 muestra las salidas del sistema simulado.



**Figura 6** Salidas del sistema en presencia de  $Ff_1$

Fuente: Elaboración propia

La figura 7 muestra el comportamiento de los residuos en presencia de la falla  $Ff_1$ .



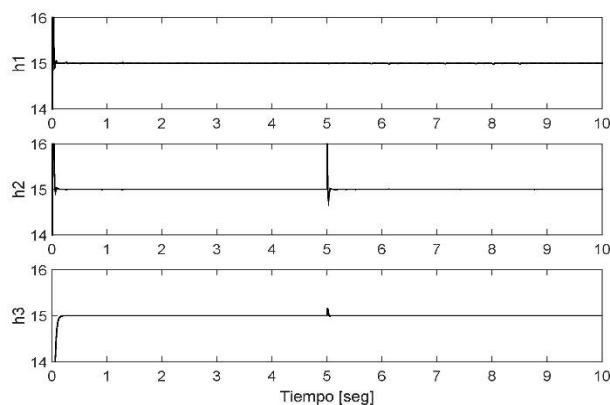
**Figura 7** Residuos en presencia de la falla  $Ff_1$

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los residuos  $r_1$  y  $r_5$  son diferentes de cero, lo cual indica la sensibilidad que presentan ante esta falla. Este comportamiento va de acuerdo a la tabla de firmas presentada anteriormente. Mientras que los residuos  $r_2$ ,  $r_3$  y  $r_6$  son en todo momento iguales a cero, lo cual indica que estos presentan insensibilidad a tal falla.

## 2 Segunda simulación: Falla en Sensor 2 ( $Fs_2$ )

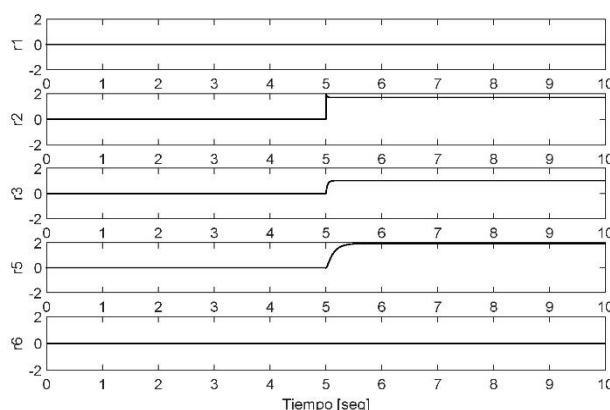
Para la segunda simulación se contempla la falla  $Fs_2$  la cual afecta al sensor número dos. La figura número 8 muestra el comportamiento de las salidas en presencia de esta falla.



**Figura 8** Salidas del sistema en presencia de  $Fs_2$ .

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de los residuos ante la presencia de  $Fs_2$  se muestra en la figura número 9.

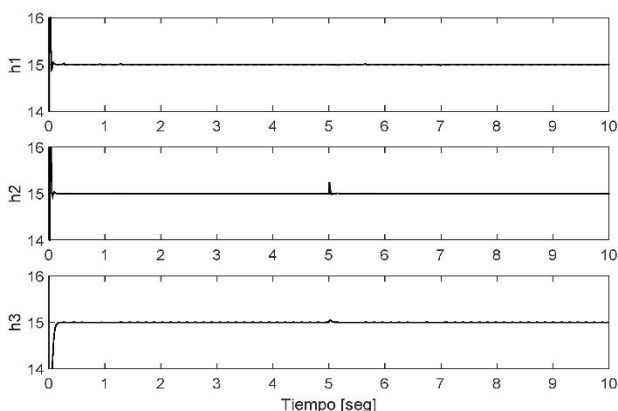


**Figura 9** Residuos en presencia de la falla  $Fs_2$

Fuente: Elaboración propia

## 3 Tercera simulación: Falla en Actuador 2 ( $Fa_2$ )

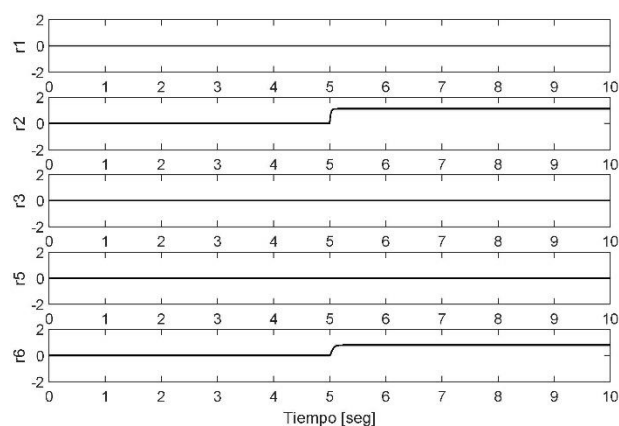
Para la tercera simulación se contempla la presencia de la falla en el actuador 2, las respuestas de las salidas del sistema simulado ante la falla  $Fa_2$  se observa en la figura número 10.



**Figura 10** Salidas del sistema en presencia de  $Fa_2$

Fuente: Elaboración propia

En la figura 11 se puede observar el comportamiento de los residuos cuando la falla  $Fa_2$  se hace presente en el sistema.



**Figura 11** Residuos en presencia de la falla  $Fa_2$

Fuente: Elaboración propia

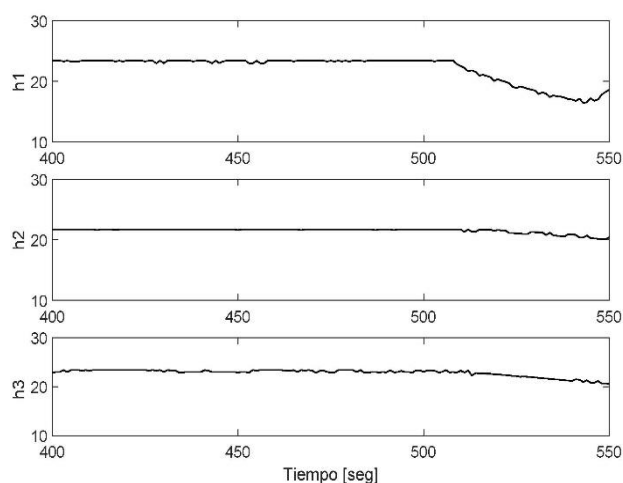
## Resultados de las pruebas físicas

Para validar los resultados obtenidos en la simulación se realizaron diferentes pruebas físicas en la plataforma experimental.

### 1 Primera prueba: Fuga en tanque 1 ( $Ff_1$ )

Para la primera prueba se produjo una fuga en el tanque número uno, la cual tiene una magnitud de 50 % respecto a la apertura de la válvula de salida.

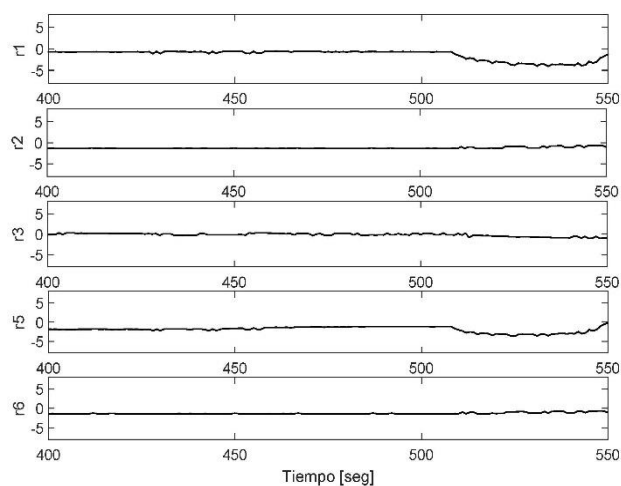
La figura 12 muestra la respuesta del sistema cuando la falla  $Ff_1$  está presente.



**Figura 12** Salidas del sistema en presencia de  $Ff_1$

Fuente: Elaboración propia

La figura 13 muestra la evolución de los residuos cuando la falla está presente.



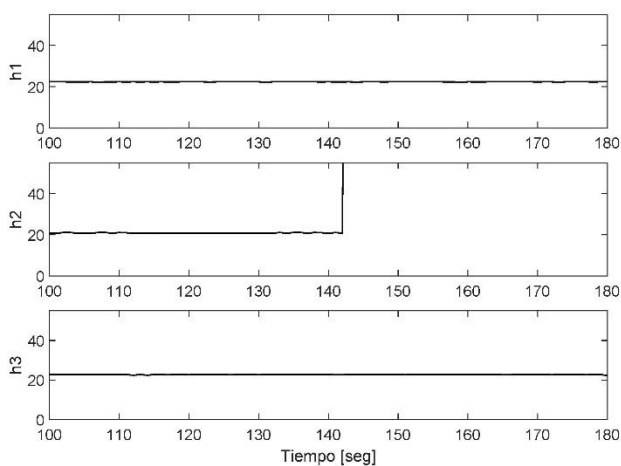
**Figura 13** Residuos en presencia de la falla  $Ff_1$

Fuente: Elaboración propia

Los residuos que son diferentes de cero indican que estos son afectados por la falla, mientras lo que son insensibles a esta falla, no presentan variaciones en su comportamiento.

### 2 Segunda prueba: Falla en Sensor 2 ( $Fs_2$ )

Para la segunda prueba se produjo una falla en el sensor número 2, la cual consistió en aplicar computacionalmente una ganancia a la señal adquirida del sensor número dos, el cual corresponde al nivel del tanque dos. La figura 14 muestra las salidas del sistema cuando esta falla está presente.

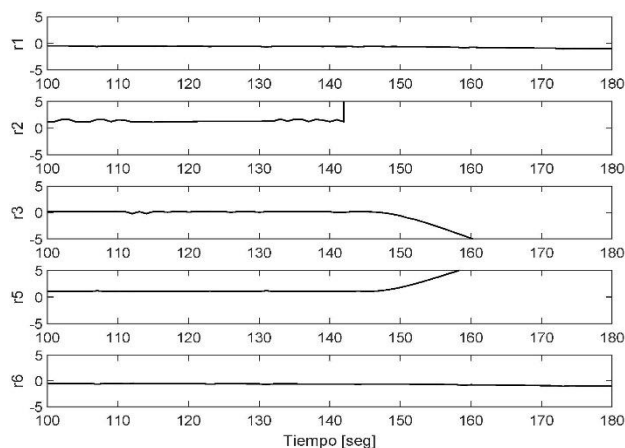


**Figura 14** Salidas del sistema en presencia de  $Fs_2$

Fuente: Elaboración propia

Mientras que la figura 15 muestra la respuesta de los residuos cuando esta misma falla se hace presente.





**Figura 15** Residuos en presencia de la falla  $Fs_2$

Fuente: *Elaboración propia*

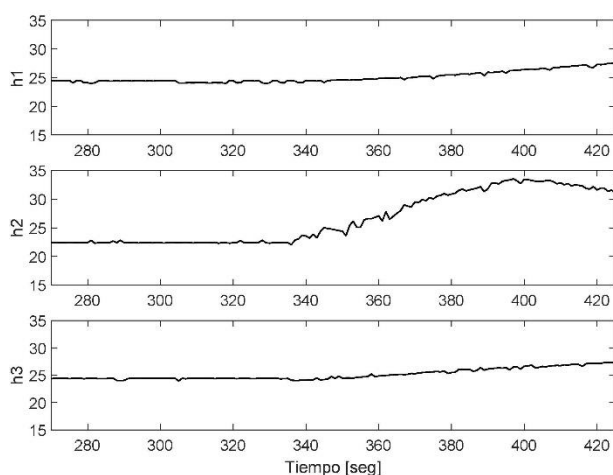
Como se puede observar en la figura anterior, los residuos  $r_2$ ,  $r_3$  y  $r_5$ , son diferentes de cero cuando ocurre la falla, demostrando una sensibilidad a esta, mientras que los residuos  $r_1$  y  $r_6$  permanecen en cero todo el tiempo, lo cual indica insensibilidad a la falla.

### 3 Tercera prueba: Falla en Actuador 2 ( $Fa_2$ )

Para la tercera prueba se produjo una falla en el actuador número dos, el cual corresponde a la bomba que suministra líquido al tanque número dos.

La falla se produjo computacionalmente, adicionándole una ganancia a la señal de salida que controla la bomba.

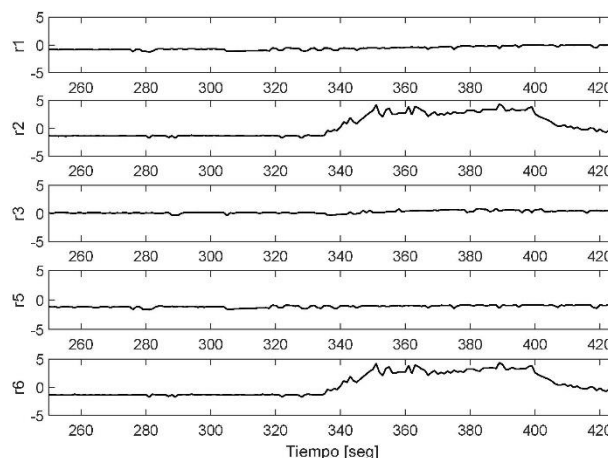
La figura 16 muestra la salida del sistema cuando esta falla está presente.



**Figura 16** Salidas del sistema en presencia de  $Fa_2$

Fuente: *Elaboración propia*

La figura 17 muestra la evolución de los residuos cuando esta falla está presente.



**Figura 17** Residuos en presencia de la falla  $Fa_2$

Fuente: *Elaboración propia*

Se puede observar que los residuos  $r_2$  y  $r_6$  son diferentes de cero cuando ocurre la falla, mientras que los residuos restantes permanecen en cero.

### Conclusiones

La detección oportuna de fallas en los sistemas físicos, juega un papel importante, previniendo accidentes y el paro de estos.

En base a los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la experimentación, se pudo comprobar la efectividad para la detección de fallas en base a observadores.

La plataforma experimental realizada, ayudo a la comprobación de los resultados obtenidos en la simulación, y abre las posibilidades no solo de simular, si no también, de probar algoritmos nuevos, tanto para la detección de fallas como para la aplicación de controles tolerantes a fallas, los cuales nos brindaran información importante para su empleo en procesos de la industria.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Tamaulipas – Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa Rodhe por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

## Referencias

- Besançon, G., Georges, D., Begovich, O., Verde, C., & Aldana, C. (2007, July). Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines. In *Control Conference (ECC), 2007 European* (pp. 5666-5670). IEEE.
- Birk, J., & Zeitz, M. (1988). Extended Luenberger observer for non-linear multivariable systems. *International Journal of Control*, 47(6), 1823-1836.
- Chen, J., & Patton, R. J. (2012). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems* (Vol. 3). Springer Science & Business Media.
- Ding, S. X. (2008). *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media.
- Duan, G. and Patton, R. (2001). Robust fault detection using Luenberger-type unknown input observers-a parametric approach. *International Journal of Systems Science*, vol. 32, no. 4, pp. 533-540
- Frank, P. M., & Ding, X. (1997). Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of process control*, 7(6), 403-424.
- Garcia, E. A., & Frank, P. M. (1997). Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: a survey. *Control Engineering Practice*, 5(5), 663-670.
- Isermann, R. (2011). *Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems*. Springer Science & Business Media.
- Kinnaert, M. (2003). Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems. A tutorial. In *Preprints of the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS'2003* (pp. 37-50).
- Luenberger, D. G. (1964). Observing the state of a linear system. *IEEE transactions on military electronics*, 8(2), 74-80.
- Massoumnia, M. A. (1986). A geometric approach to the synthesis of failure detection filters. *IEEE Transactions on automatic control*, 31(9), 839-846.
- Nijmeijer, H. (1999). *New directions in nonlinear observer design* (Vol. 244). T. I. Fossen (Ed.). Berlin: Springer.
- Rodriguez, L. and Alcorta-García, E. (2015). De la representación de sistemas Euler-Lagrange a la hamiltoniana generalizada, *Nova Scientia*. vol. 7, no. 14, pp. 1-23.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K. and Kavuri, S. (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods. *Computers & chemical engineering*, vol. 27, no. 3, pp. 293-311.
- Verde, C., Gentil, S., & Morales-Menéndez, R. (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Editorial Trillas.