

Estimación de nivel de interfases líquidas basada en modelo

Cesar A. Peregrino de la Cruz *
Carlos M. Astorga-Zaragoza * Alejandro Alvarado-Lassman **
Juan Reyes-Reyes * Guadalupe Madrigal-Espinosa *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Internado Palmisa s/n,
C.P. 62490 Cuernavaca, Mor., México, E-mail: cesar.peregrino18ee,
astorga, juanreyesreyes@cenidet.edu.mx*

** *Tecnológico Nacional de México/I.T. de Orizaba, Oriente 9,
Emiliano Zapata, 94320 Orizaba, Ver., E-mail:
lassman@prodigy.new.com*

Resumen. En este trabajo se propone un método alternativo para la estimación del nivel de dos líquidos de diferentes densidades que forman una interfase dentro de un tanque. Para conseguir el objetivo, primero se desarrolla un modelo matemático no lineal que se obtiene a partir de las dinámicas de los fluidos en el contenedor, siendo esta la primera contribución del artículo. La segunda contribución es la estimación del nivel de cada uno de los líquidos que conforman la interfase, basada únicamente en la medición de la presión en el fondo del tanque mediante un transmisor de presión diferencial y el diseño de un observador no lineal de alta ganancia.

Keywords: Interfases líquidas, sensores virtuales, sensores indirectos, Observador.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria es común encontrar procesos donde se necesita controlar los niveles de contenidos líquidos, principalmente aquellas industrias en las que en sus procesos se involucran aceites, solventes, combustibles, aguas residuales entre otros líquidos de diferente naturaleza.

Existen algunos procesos con contenedores de líquidos en el que los contenidos de estos no son puros u homogéneos. En este tipo de procesos se ven involucrados líquidos de diferentes densidades en un mismo contenedor formando interfases líquidas dentro del mismo cuando estos líquidos no son miscibles (por ejemplo aceite y agua).

Por ejemplo, los contenedores de petróleo suelen generar capas de emulsiones formando interfases líquidas en el contenedor. Para lograr medir estos niveles comúnmente se utilizan métodos directos tales como cristales de nivel (glass level gauges), o indirectos tales como sondas de inserción que aprovechan las propiedades de conductividad o de impedancia de los líquidos. Sin embargo, existen ocasiones en que los métodos existentes presentan ciertos problemas de implementación, ya sea debido a la ubicación en que se presenta la interfase o la localización de los tanques contenedores. El costo y la disponibilidad de ciertos instrumentos es otra variable que interviene al momento de decidir qué método utilizar o bien, la naturaleza de los líquidos (corrosividad, acidez, alcalinidad) impide el uso de algunos sensores que son susceptibles a una

pronta degradación de los mismos. Por ejemplo, en los biorreactores de lecho fluidizado, donde el material fluidizado puede considerarse de distinta densidad al medio acuoso, las opciones de medición de la altura del lecho son muy limitadas y los equipos de medición muy costosos debido a que se tienen que utilizar métodos lo menos invasivo posible debido a la presencia de microorganismos y a la acidez del medio.

En este artículo se propone un método para estimar el nivel de dos líquidos de distinta densidad que forman una interfase en un contenedor. El método se basa en el diseño de un observador basado en un modelo matemático. El observador es capaz de estimar cada uno de los niveles de los líquidos, basado solamente en la medición de la presión en el fondo del tanque.

La idea de utilizar modelos matemáticos para la estimación de nivel en un tanque no es nueva. Por ejemplo en [Gatzke et al. 2000] se realiza un controlador de nivel para un sistema de 4 tanques utilizando dos métodos basados en el modelo matemático. De igual manera en [Nithya et al. 2008] se desarrolla un controlador basado en modelo para un tanque esférico el cual busca controlar los niveles de líquido. En [Srinivas et al. 2014] se muestran las sintonizaciones de controladores PID utilizando un modelo matemático para tres tanques en cascada. En estos estudios se utilizan diferentes modelos matemáticos para diferentes configuraciones del sistema de tanques buscado un mismo objetivo: la regulación de los niveles de

líquido. Sin embargo, en todos estos estudios, los modelos matemáticos que se utilizan para representar las dinámicas de los líquidos en un contenedor o tanque son para líquidos homogéneos.

En lo que respecta al uso de observadores como sensores virtuales, existen numerosos trabajos en la literatura en la que se ha demostrado la eficacia de estos para la estimación de variables de proceso. Por ejemplo, en [Lafont et al. 2011] se utiliza un observador de alta ganancia para la estimación de variables químicas y biológicas en un sistema de tratamiento de aguas residuales. Al ser un proceso bioquímico el uso de sensores convencionales implican mediciones con ruidos y equipos con costos de mantenimiento altos. En [Anzures-Marin et al. 2008] se utilizaron observadores para entradas desconocidas para un esquema de detección y localización de fallas en un sistema hidráulico de dos tanques. Recientemente en [Gouta et al. 2019] se realiza un control adaptativo para un sistema de dos tanques acoplados sin sensores utilizando observadores de alta ganancia adaptables y una estrategia de control no lineal generalizada.

La originalidad de este trabajo consiste en primer lugar, en desarrollar un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico de los niveles de dos líquidos que conforman una interfase. Como segunda contribución, este modelo es utilizado para estimar ambos niveles utilizando únicamente la medición de la presión en el fondo del tanque. Para ello, se diseña un observador no lineal de alta ganancia que realiza el papel de sensor virtual.

2. MEDICIÓN DE NIVEL POR PRESIÓN DIFERENCIAL

Este método se basa en el principio de medir la carga o presión hidrostática. Es independiente del volumen del líquido implicado o de la forma del recipiente. El sistema no mide el nivel de líquido sino la presión ejercida, siendo la presión proporcional a la columna de líquido [Antonio 1997].

$$H = \frac{P}{\rho g} \quad (1)$$

donde H es la altura del líquido, ρ es su densidad y g la constante de gravedad.

La presión diferencial que mide el transmisor en la Fig. 1 está dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta P = AP(\text{Alta Presión}) - BP(\text{Baja Presión})$$

Sustituyendo el lado de alta presión AP ;

$$\Delta P = (H \rho g + BP) - BP$$

Donde el lado de baja presión puede ser sustituido por la presión atmosférica si es un tanque abierto. En este caso en un tanque cerrado no presurizado, por lo tanto el lado de baja presión es cero. Se obtiene entonces que:

$$P = H \rho g \quad (2)$$

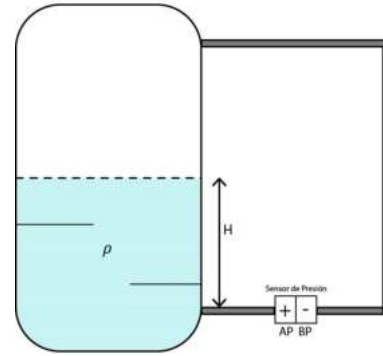


Figura 1. Tanque cerrado con un solo componente

Considere ahora un sistema con una interfase líquida, como puede ser gas licuado de petróleo (LPG) y agua de proceso, similar al mostrado en la Fig. 2. En este caso el principal interés es conocer el nivel de agua decantada en el recipiente, es decir, el nivel de líquido más denso. Utilizando el mismo principio y considerando las condiciones que se presentan en la Fig. 2 (sin tomar en cuenta las entradas y salidas de flujo), la presión total medida por el instrumento en el fondo del tanque es:

$$P = g(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) \quad (3)$$

donde h_1 y ρ_1 corresponden a la altura y densidad del líquido más pesado, mientras que h_2 y ρ_2 corresponden a las mismas variables para el líquido más ligero.

A partir de esta ecuación se puede conocer la altura h_1 de la interfase suponiendo que se conoce h_2 :

$$h_1 = \frac{P - h_2 \rho_2 g}{g \rho_1} \quad (4)$$

3. MODELO MATEMÁTICO DE UN CONTENEDOR CON UNA INTERFASE LÍQUIDA

En esta sección se presenta el modelado matemático de las dinámicas de un tanque cuyo contenido son dos fluidos de diferentes densidades, por lo tanto, no son miscibles y forman una interfase líquida entre ellos. Para la obtención del modelo se consideran algunas simplificaciones que reducen la complejidad del modelo.

Suposiciones de Modelado. Para el desarrollo del modelo matemático se toman en cuenta las siguientes suposiciones de modelado :

- Se consideran dos fluidos incomprensibles, puros y con densidad constante.
- No se consideran retardos en el proceso.
- El proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente.
- Se consideran válvulas lineales.
- Tanque cerrado sin presión.

3.1 Descripción del Sistema

Se tiene un tanque contenedor con dos líquidos de diferente composición y densidad como se muestra en la

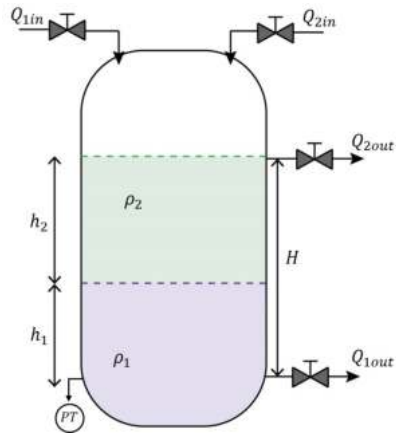


Figura 2. Diagrama de un tanque cerrado con dos componentes y una interfase

Fig. 2. Este contenedor tiene dos flujos de entrada Q_{1in} y Q_{2in} con sus respectivas válvulas y a la vez dos flujos de salida Q_{1out} y Q_{2out} . Q_{2in} es el flujo de entrada del elemento más ligero y su flujo de salida es representado por Q_{2out} . Por otra parte, Q_{1in} es el flujo del líquido con mayor densidad que se acumulará en el fondo del tanque y su flujo de salida es representado por Q_{1out}

3.2 Procedimiento de Desarrollo

Para el modelado del sistema se necesitan dos balances de materia, es decir, uno por cada componente.

$$dM_1 = M_{1in} - M_{1out} \quad dM_2 = M_{2in} - M_{2out} \quad (5)$$

En función de los niveles las ecuaciones son:

$$\frac{Adh_1}{dt} = Q_{1in} - Q_{1out} \quad \frac{Adh_2}{dt} = Q_{2in} - Q_{2out} \quad (6)$$

Para modelar los flujos de entrada se utilizan valores constantes debido a que se considera que se conocen los flujos de entrada al sistema. Para los flujos de salida Q_{1out} y Q_{2out} es posible utilizar un modelo basado en la ecuación de Bernoulli. La ecuación de Bernoulli afirma que la suma de la energía cinética, la energía potencial y la de flujo de una partícula de fluido es constante a lo largo de una línea de corriente en el flujo estacionario [Yunus and John 2006].

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (7)$$

donde $\frac{V^2}{2}$ es la *energía cinética*, gz es la *energía potencial* y $\frac{P}{\rho}$ es la *energía de flujo*, todo por unidad de masa. Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli puede concebirse como una expresión del balance de energía mecánica.

Cálculo de la velocidad de cada flujo. El valor de la *constante* que se muestra en la ecuación 7 puede evaluarse en cualquier punto de la línea de corriente en donde se conocen la presión, densidad, velocidad y elevación. La ecuación de Bernoulli también puede escribirse entre dos

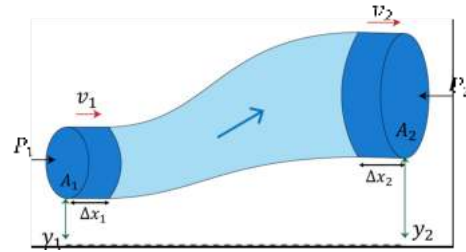


Figura 3. Principio de Bernoulli

puntos cualesquiera sobre la misma línea de corriente (véase fig 3) de la siguiente manera:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g y_2 \quad (8)$$

Para este sistema se analizará una línea de corriente para cada flujo de manera independiente y tomando en cuenta algunas suposiciones dependiendo el flujo de salida que se quiere calcular. Con la ecuación 8 podemos calcular la velocidad del fluido v_2 la cual permitirá conocer el caudal de salida a través de un orificio.

Para calcular el flujo de salida Q_{1out} se utiliza la ecuación 8 tomando en cuenta las siguientes suposiciones:

- La presión P_1 será igual a la suma de la presión existente en el contenedor (nula en este caso) más la presión ejercida por el cuerpo del fluido mas ligero que se encuentra encima de este.
- La velocidad V_1 es muy baja en comparación a la velocidad V_2 por lo que se toma como 0.
- La altura y_2 se toma como 0 pues es la referencia de nivel a la salida.
- La altura y_1 es la altura de h_1 únicamente.
- ρ en la densidad del flujo que se esta analizando; en este caso ρ_1

De esta manera la ecuación de Bernoulli queda como se muestra a continuación:

$$P_1 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (9)$$

Despejando la velocidad de la Ec. 9 se obtiene que la velocidad en el flujo de salida Q_{1out} es:

$$V_2 = \sqrt{2 \left(\frac{P_1}{\rho} + g y_1 \right)} \quad (10)$$

Obtenida la velocidad del flujo para Q_{1out} se puede calcular el caudal de salida. Esto multiplicando la velocidad del flujo por el área del orificio de la válvula de salida $Q = V_2 k$.

Realizando el cambio de variable al sistema con las suposiciones antes tomadas se tiene que el flujo de salida:

$$Q_{1out} = k \sqrt{\frac{2\rho_2 g h_2}{\rho_1} + 2g h_1} \quad (11)$$

Donde P_1 se sustituyó de acuerdo a la formula de presión de la ecuación 2

Para calcular el flujo de salida Q_{2out} Se utiliza de igual manera la ecuación 8 pero tomando las siguientes condiciones:

- La presión P_1 será igual a la presión atmosférica si de un tanque abierto se tratara. Para este caso es cero.
- P_2 igualmente es cero.
- La velocidad V_1 es muy baja en comparación a la velocidad V_2 por lo que se toma como 0.
- La altura y_1 que es la altura con referencia desde h_1 a la que se encuentra h_2 que se encuentra por encima de esta.
- La altura y_2 que es la altura de la válvula por donde saldrá el flujo Q_{2out} (H).

Por lo tanto se obtiene la ecuación de Bernoulli para la velocidad del flujo Q_{2out}

$$\rho g y_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g y_2 \quad (12)$$

Despejando la velocidad

$$V_2 = \sqrt{2g(y_1 - y_2)} \quad (13)$$

Realizando de igual manera el cambio de variable para el flujo que se esta analizando se tiene que el caudal de salida Q_{2out} :

$$Q_{2out} = k \sqrt{2g(h_2 + h_1 - H)} \quad (14)$$

Con los flujo de salida calculados para ambos componentes es posible ya obtener las ecuaciones que describan la dinámica del sistema. Utilizando las ecuaciones 6 y sustituyendo los valores de los caudales de salida. Con estas consideraciones se obtiene:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_{1in}}{A} - \frac{1}{A} k \sqrt{2g \left(\frac{\rho_2 h_2}{\rho_1} + h_1 \right)} \quad (15)$$

La segunda ecuación diferencial del sistema para el fluido más ligero será:

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Q_{2in}}{A} - \gamma(t) \quad (16)$$

donde la función $\gamma(t)$ está asociada a la pérdida de líquido a través de la válvula asociada a Q_{2out} . La activación de esta función depende de la altura del segundo componente es decir:

$$\gamma(t) = \frac{1}{A} k \sqrt{2g(h_2 + h_1 - H)} \quad \forall h_2 + h_1 \geq H; \quad (17)$$

$$\gamma(t) = 0 \quad \forall h_2 + h_1 < H; \quad (18)$$

De esta manera se interpreta que el aumento del volumen del componente más ligero se comportará de manera lineal hasta que sobrepase el nivel H , donde la segunda válvula esta situada. A partir de ahí cualquier aumento de nivel

empezará a salir por la válvula correspondiente al flujo Q_{1out} .

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento del modelo matemático con las condiciones iniciales del contenido por debajo del nivel de salida Q_{1out} . Se observa como h_2 crece de manera lineal mientras h_1 decrece conforme h_1 aumenta. Para este caso no se tomaron en cuenta las imitaciones físicas del sistema, por lo que un mayor tiempo de simulación incrementaría de manera infinita los niveles.

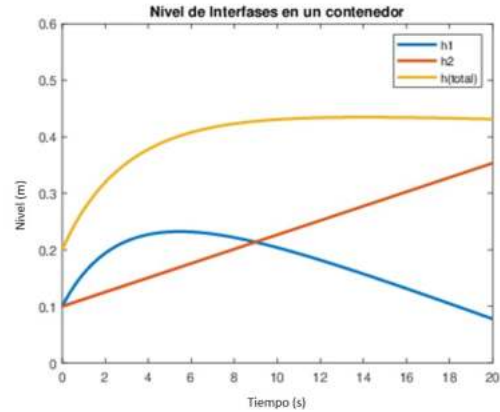


Figura 4. Simulación 1 del modelo matemático

En la Fig. 5 se observa el comportamiento del modelo con condiciones iniciales que sumadas de un valor cerca del nivel H , altura a la que se encuentra la válvula Q_{1out} .

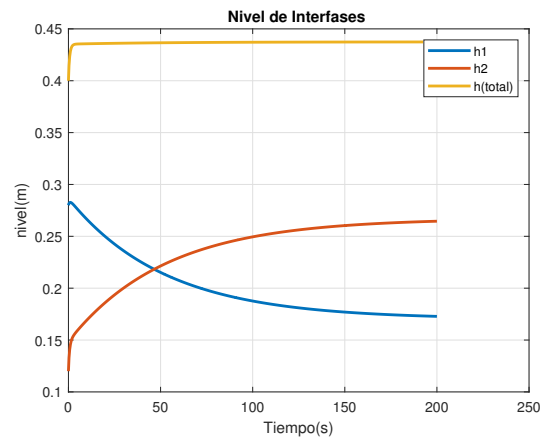


Figura 5. Simulación 2 del modelo matemático

Para este estudio se considera que la suma de los niveles h_1 y h_2 siempre estará por encima de H (válvula de salida Q_{2out}), por tanto habrá siempre un flujo de salida de ambos componentes. De esta manera las ecuaciones del sistema serán las siguientes.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_{1in}}{A} - \frac{1}{A}k\sqrt{2g\left(\frac{2\rho_2h_2}{\rho_1} + h_1\right)} \quad (19)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{Q_{2in}}{A} - \frac{1}{A}k\sqrt{2g(h_2 + h_1 - H)} \quad (20)$$

4. DISEÑO DE UN OBSERVADOR DE ALTA GANANCIA

Se pretende diseñar un observador de alta ganancia para estimar los estados (alturas h_1 y h_2) de un tanque cuyo contenido serán dos fluidos de diferentes densidades que forman una interfase líquida entre ellos. A partir del sistema mostrado en la Fig. 2.

Utilizando las ecuaciones del sistema 19 y 20, el cual se puede representar mediante un modelo no lineal afín al control.

$$\dot{x} = f(x) + B_1u_1 + B_2u_2, \quad y = h(x) \quad (21)$$

o bien:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{h}}_1 \\ \dot{\hat{h}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A}k\sqrt{2g\left(\frac{2\rho_2h_2}{\rho_1} + h_1\right)} \\ -\frac{1}{A}k\sqrt{2g(h_1 + h_2 - H)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} Q_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{A} \end{bmatrix} Q_2 \quad (22)$$

La salida $h(x)$ es:

$$h(x) = g \cdot (\rho_1h_1 + \rho_2h_2) \quad (23)$$

La Ec. 23 representa la presión en el fondo del contenedor medida por el instrumento.

4.1 Observador de Alta Ganancia

Para el diseño del observador de alta ganancia se utiliza la estructura propuesta por [Gauthier et al. 1992]

$$\dot{\hat{x}} = f(x) + B_1u_1 + B_2u_2 + \left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right)^{-1} S_\theta^{-1} C^T (y - \hat{y}) \quad (24)$$

Donde y es la salida del sistema no lineal $h(x)$. Φ es una transformación de coordenadas dada por

$$z = \Phi(x) = \begin{pmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \end{pmatrix} \quad (25)$$

donde $L_f h(x)$ representa la derivada de Lie de $h(x)$ en dirección de $f(x)$ y S_θ^{-1} es una matriz simétrica cuadrada que da solución a la siguiente ecuación de Lyapunov

$$\theta S_\theta + A^T S_\theta + S_\theta A = C^T C, \quad \theta > 0 \quad (26)$$

donde $C = [1 \ 0]$ y $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ son matrices que corresponden al sistema transformado en el dominio de la variable transformada $z = \Phi(x)$. Para todos los sistemas de segundo orden, la matriz S_θ^{-1} que da solución a la Ec. (26) es:

$$S_\theta^{-1} = \begin{bmatrix} 2\theta & \theta^2 \\ \theta^2 & \theta^3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Se puede verificar que el sistema es observable verificando que :

$$\text{rank} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) = n \quad (28)$$

Como resultado se tiene que el sistema dado por las Ecs. (19) y (20) es observable. Las Ecs. del observador son:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{h}}_1 \\ \dot{\hat{h}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A}k\sqrt{2g\left(\frac{\rho_2\hat{h}_2}{\rho_1} + \hat{h}_1\right)} \\ -\frac{1}{A}a_2k_2\sqrt{2g(\hat{h}_1 + \hat{h}_2 - H)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} \\ 0 \end{bmatrix} Q_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{A} \end{bmatrix} Q_2 + \left(\frac{\partial\Phi(\hat{h})}{\partial\hat{h}}\right)^{-1} \begin{bmatrix} 2\theta & \theta^2 \\ \theta^2 & \theta^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} (g(\rho_1\hat{h}_1 + \rho_2\hat{h}_2) - g(\rho_1\hat{h}_1 + \rho_2\hat{h}_2)) \quad (29)$$

El resultado del jacobiano inverso de $\Phi(\hat{h})$ esta dado por:

$$\left(\frac{\partial\Phi(\hat{h})}{\partial\hat{h}}\right)^{-1} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$a_{1,1} = \frac{-\frac{g^{3/2}\rho_2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}} - \frac{g^2k\rho_2\sqrt{\rho_1}}{A\sqrt{2g(\hat{h}_1\rho_1+\rho_2\hat{h}_2)}}}{-\frac{g^{5/2}\rho_1\rho_2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}} + \frac{g^{5/2}\rho_2^2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}}}$$

$$a_{1,2} = -\frac{g\rho_2}{-\frac{g^{5/2}\rho_1\rho_2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}} + \frac{g^{5/2}\rho_2^2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}}}$$

$$a_{2,1} = \frac{\frac{g^{3/2}\rho_2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}} + \frac{g^2\rho_1^{3/2}k}{A\sqrt{2g(\hat{h}_1\rho_1+\rho_2\hat{h}_2)}}}{-\frac{g^{5/2}\rho_1\rho_2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}} + \frac{g^{5/2}\rho_2^2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}}}$$

$$a_{2,2} = \frac{g\rho_1}{-\frac{g^{5/2}\rho_1\rho_2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}} + \frac{g^{5/2}\rho_2^2k}{A\sqrt{2(\hat{h}_1+\hat{h}_2-H)}}}$$

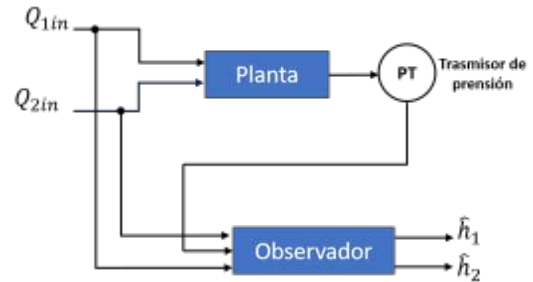


Figura 6. Diagrama de bloques del observador

Se realiza la simulación del sistema y el observador de alta ganancia utilizando diferentes condiciones iniciales para el modelo simulado y para el observador. Los resultados se muestran en la Fig. 7. De acuerdo con el análisis de estabilidad del observador presentado en [Gauthier et al. 1992], es suficiente que los valores de la ganancia del observador θ siempre sean positivos. El valor de θ se elige dependiendo del tiempo de convergencia deseado. Mientras mayor es el valor de θ , menor es el tiempo de convergencia. Sin embargo, altos valores de θ no son deseables, debido a que se incrementa la sensibilidad al ruido de medición.

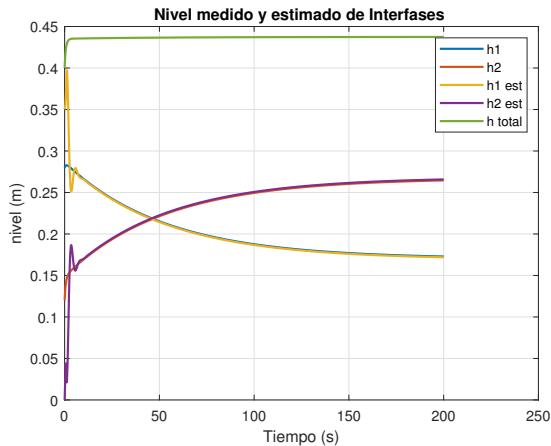


Figura 7. Gráfica de la convergencia del observador a los estados estimados

TABLA 1. NOMENCLATURA

Variable	Descripción
Q_{1in}	Flujo de entrada del componente 1
Q_{2in}	Flujo de entrada del componente 2
Q_{1out}	Salida del Componente 1
Q_{2out}	Salida del Componente 2
h_1	Altura del elemento 1(Interfase)
h_2	Altura del elemento 2
H	Altura de la Válvula de salida Q_{2out}
ρ_1	Densidad del componente 1
ρ_2	Densidad del componente 2
k	Área del orificio de salida
A	Área transversal del contenedor
g	gravedad
PT	Presión total medida $P = g \cdot (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2)$

TABLA 2. PARÁMETROS

Variable	valor
Q_{1in}	$0.002 \text{ m}^3/\text{s}$
Q_{2in}	$0.0006 \text{ m}^3/\text{s}$
H	0.4 m
ρ_1	$1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
ρ_2	$920 \text{ kg}/\text{m}^3$
k	$7e^{-4} \text{ m}^2$
A	$79e^{-4} \text{ m}^2$
g	$9.81 \text{ m}/\text{s}^2$

TABLA 3. CONDICIONES INICIALES

Simulación	h_1	h_2	\hat{h}_1	\hat{h}_2
Fig. 1	0.1m	0.1 m		
Fig. 2	0.28m	0.12 m		
Fig. 3	0.28m	0.12m	0.35m	0 m

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una alternativa de medición de nivel en tanques o contenedores que presenten interfaces líquidas. Una de las aportaciones de este trabajo es un

modelo matemático que representa las dinámicas del nivel de líquidos con interfase en un contenedor. La importancia de un modelo matemático para este tipo de sistemas radica en poder diseñar a futuro un control basado en modelo, la implementación de otro tipo de observadores para monitorización y esquemas de detección de fallas.

Como segunda aportación, se diseña un observador de alta ganancia para el sistema que permite la estimación de los niveles de cada uno de los líquidos. El control de nivel en sistemas con procesos líquidos mediante observadores brinda una considerable ventaja económica al reducir el número de sensores físicos.

REFERENCIAS

- Antonio, C. (1997). Instrumentación industrial. *Alfaomega grupo editor, México*.
- Anzures-Marin, J., Pitalua-Diaz, N., Cuevas-Silva, O., and Villar-García, J. (2008). Unknown inputs observers design for fault detection in a two-tank hydraulic system. In *2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA'08)*, 373–378. IEEE.
- Gatzke, E.P., Meadows, E.S., Wang, C., and Doyle Iii, F.J. (2000). Model based control of a four-tank system. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), 1503–1509.
- Gauthier, J.P., Hammouri, H., and Othman, S. (1992). A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors. *IEEE Transactions on automatic control*, 37(6), 875–880.
- Gouta, H., Saïd, S.H., Turki, A., and M'Sahli, F. (2019). Experimental sensorless control for a coupled two-tank system using high gain adaptive observer and nonlinear generalized predictive strategy. *ISA transactions*, 87, 187–199.
- Lafont, F., Busvelle, E., and Gauthier, J.P. (2011). An adaptive high-gain observer for wastewater treatment systems. *Journal of Process Control*, 21(6), 893–900.
- Levine, I.N. (1993). *Físico química*. McGraw-Hill Interamericana,.
- Mott, R.L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Pearson educación.
- Nithya, S., Sivakumaran, N., Balasubramanian, T., and Anantharaman, N. (2008). Model based controller design for a spherical tank process in real time. *IJSSST*, 9(4), 25–31.
- Srinivas, P., Lakshmi, K.V., and Kumar, V.N. (2014). A comparison of pid controller tuning methods for three tank level process. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(1), 6810–6820.
- Yunus, C. and John, C. (2006). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. Mc Grawhill, Mexico, 3.