



ESTRATEGIAS PRÁCTICAS PARA MODELADO Y CONTROL DE UN SEPARADOR GAS-LÍQUIDO BAJO CONDICIONES DE FLUJO INTERMITENTE

(Practical Strategies for modeling and control of a Gas-Liquid Separator Low
Intermittent Flow Conditions)

César Eizaga

Universidad Rafael Beloso Chac n. Maracaibo, Venezuela.

caec121@gmail.com

Hanna Aboukheir

Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt (UNERMB)

hanna2k2@hotmail.com

Leonardo Cáliz

Universidad Central de Venezuela. (UCV)

lcaliz@hotmail.com

RESUMEN

En el presente estudio se logró la caracterización de un separador gas-líquido de tipo horizontal bajo condiciones de flujo intermitente, a través de la estrategia de identificación de sistemas conocida como modelado en caja gris. Para ello, se empleó el modelo teórico generalizado desarrollado en función de las leyes físicas que intervienen en el proceso, así como los datos del separador recolectados por Giozza (1983). Conocidos tanto el modelo teórico como los datos del proceso, se determinaron los parámetros del sistema a través de las herramientas de identificación de sistemas de Matlab . Se seleccionó el sistema de control óptimo dada la complejidad del sistema a controlar: separadores gas-líquido, los cuales son equipos de separación dispuestos en estaciones de flujo y centros operativos de producción. Finalmente, se determinó el controlador óptimo para el sistema modelado donde se compararon las respuestas del sistema para diferentes estrategias de control tales como: controlador PID y PI- ptimo.

Palabras Clave: Modelado en Caja Gris, Separador gas-líquido, Sistema de Control  ptimo, Controlador PID, Controlador PI- ptimo.

ABSTRACT

In the present study achieved the characterization of a gas-liquid separator of horizontal under intermittent flow conditions through the system identification strategy known as gray box modeling. This theoretical model used widely developed on the basis of physical laws involved in the process and data collected by the separator Giozza (1983). Known as both the theoretical model of the process data to determine the parameters of the system through system identification tools in Matlab . You select the optimal control system given the complexity of control system: gas-liquid



separators, which are arranged in teams of separation flow stations and operational centers of production. Finally, the controller determines the optimum modeling system which compares the system's responses to different control strategies such as: Optimal PID controller and PI.

Key words: Gray Box Modeling, gas-liquid separator, Optimal Control System, PID controller, PI-Optimal Controller.

Introducción

Para lograr la caracterización de sistemas existe una diversa gama de estrategias de identificación o modelado. La escogencia de un determinado tipo de modelado depende, en gran medida, de la complejidad del sistema, de la información y de los datos que se conocen del proceso.

Si se tiene a disposición un conocimiento sólido de las leyes físicas y la dinámica que gobierna un proceso determinado, así como datos veraces de las variables primordiales de dicho proceso (entrada - salida), el uso del modelado en caja gris es una opción que se debe tomar en cuenta si se quiere llegar al modelo más próximo posible al real.

En ese sentido, si se tiene conocimiento de las leyes físicas del proceso de separación de fluidos (gas-líquido), donde entre otras interactúan de la conservación de la masa y gases ideales, de la dinámica de dicho proceso incluyendo condiciones de alta exigencia como el flujo intermitente (flujo irregular caracterizado por olas de líquido y gas dentro de una sección transversal), y de los datos disponibles del separador gas-líquido de Giozza (1983), es posible efectuar de manera precisa el modelaje del comportamiento de dicho sistema.

Para diseñar un sistema de control óptimo o un sistema regulador óptimo, se necesita encontrar una regla para determinar la decisión de control presente, sujeta a ciertas restricciones, para minimizar en alguna medida la desviación de un comportamiento ideal.

Dicha medida es provista generalmente por el índice de desempeño seleccionado, que es una función cuyo valor se considera una indicación de qué tanto se parece el desempeño del sistema real al desempeño deseado. En la mayoría de los casos, el comportamiento del sistema se hace óptimo al escoger un vector de control $u(k)$ de tal forma que el índice de desempeño se minimice (o maximice dependiendo de la naturaleza del índice de desempeño seleccionado).

Visto de otra manera, el diseño de un controlador óptimo o de cualquier naturaleza, depende de una caracterización o modelado previo del sistema a controlar, en este caso el Separador Gas-Líquido Horizontal.



Una vez logrado esto a través del modelado en caja gris, se tiene el insumo para diseñar el controlador óptimo, que no es más que la resolución de la ecuación de Ricatti para los parámetros del sistema indicados. Con esta ley de control óptimo es posible visualizar una serie de configuraciones denominadas subproblemas del control óptimo, donde se incluyen: la Regulación, Seguimiento al Estado, PI-Óptimo, entre otras, que brindan opciones al diseñador para la escogencia del controlador más adecuado en función del desempeño de estas estrategias.

Modelo matemático del separador gas-líquido horizontal bajo condición de flujo intermitente

Se estudió un separador gas-líquido de tipo horizontal con las características establecidas por Giozza (1983), entre los datos disponibles se encuentran: velocidades de tapones de líquido, distancia entre tapones, presión y nivel de líquido en el separador, posiciones de válvulas de control de líquido y gas, así como tasas de flujo de líquido y gas saliendo del separador.

Los datos antes mencionados fueron determinados a partir de las siguientes consideraciones:

- La caída de presión a lo largo de la tubería es una función lineal de su longitud.
- La caída de presión ocurre sólo en los tapones de líquido. La caída de presión en las burbujas de gas es despreciable en comparación con la de los tapones de líquido y por lo tanto no es considerada.
- La velocidad de estado estacionario del líquido en tapones es igual a la velocidad promedio de la mezcla.
- Las tasas promedio de flujo másico de entrada de líquido y gas; y la presión promedio de entrada son constantes.
- La masa de una burbuja permanece sin modificaciones, a pesar de que el volumen de una burbuja aumenta mientras viaja a través de la tubería.
- Únicamente fluye líquido a través de la línea de descarga de líquido.
- Únicamente fluye gas a través de la línea de descarga de gas.
- La presión a la salida de de ambas líneas de descarga son constantes.
- Las temperaturas en la tubería y el separador son iguales y constantes.

Comportamiento del separador bajo condiciones de flujo intermitente

El comportamiento del equipo se puede evidenciar a través de los datos de las variables de entrada y salida del sistema. Los datos utilizados para determinar el

modelo específico del sistema, con su respectiva validación, respuesta al impulso, y frecuencia tanto para el lazo de nivel como el de presión se presentan a continuación.

Lazo de Nivel

Los datos en función del tiempo (lazo abierto) utilizados, tanto para propósitos de identificación como validación, se pueden apreciar en la siguiente figura:

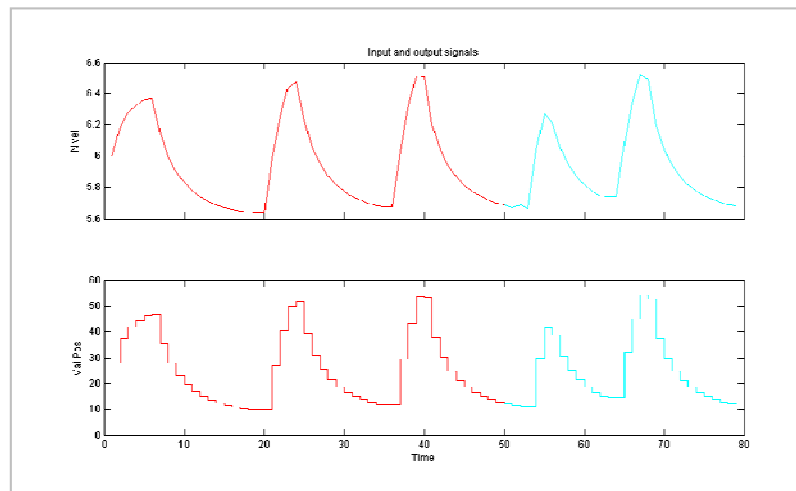


Fig. 1 Datos de identificación y validación en función del tiempo (Lazo de Nivel).

La respuesta al impulso así como la de frecuencia del sistema se muestran en las siguientes figuras:

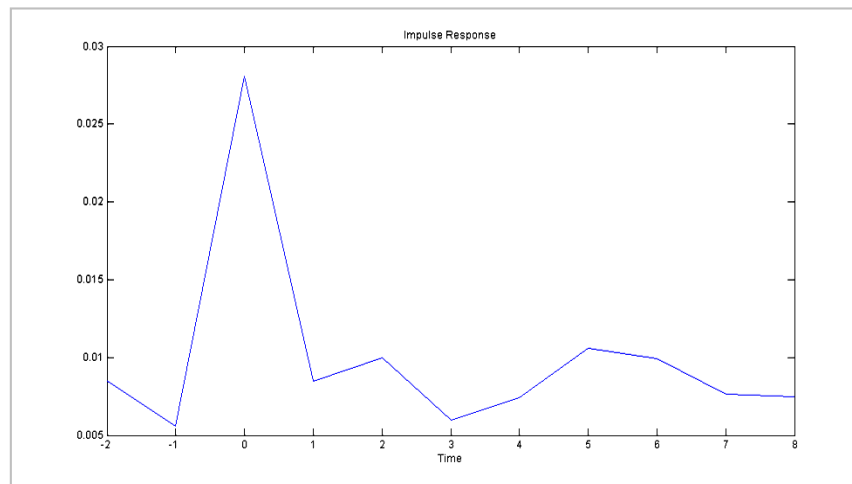


Fig. 2 Respuesta al impulso (Lazo de Nivel).

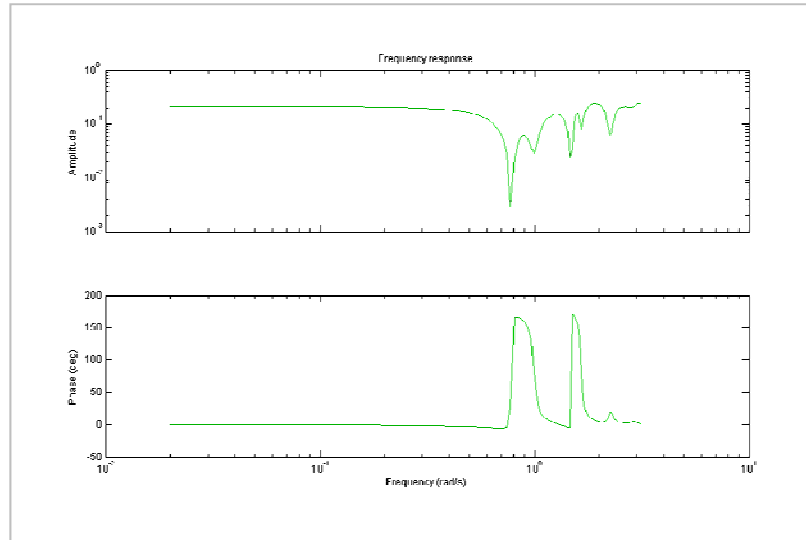


Fig. 3 Respuesta de frecuencia (Lazo de Nivel).

Lazo de Presión

Los datos en función del tiempo utilizados (lazo abierto), tanto para propósitos de identificación como validación, se puede apreciar en la siguiente figura:

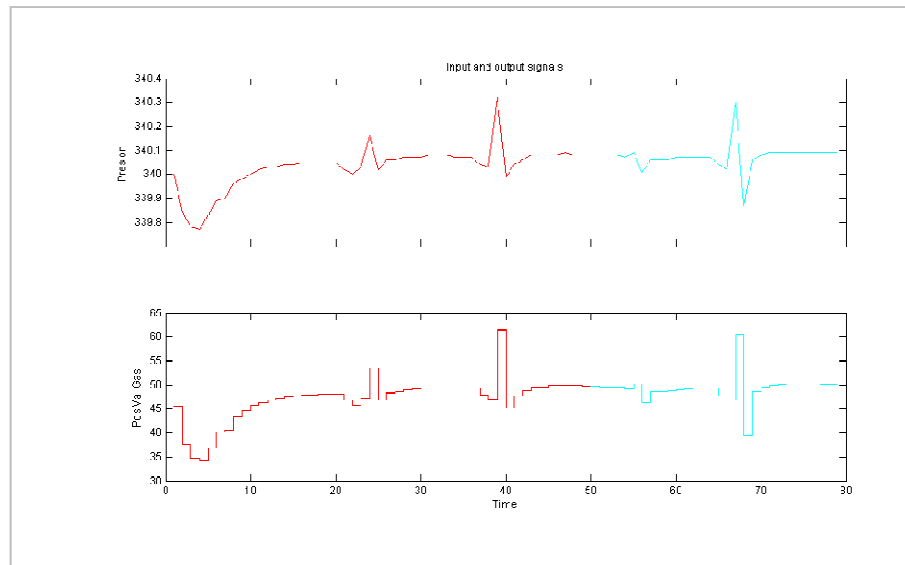


Fig. 4 Data de identificación y validación en función del tiempo (Lazo de Presión).

La respuesta al impulso y de frecuencia del sistema se muestra en las siguientes figuras:

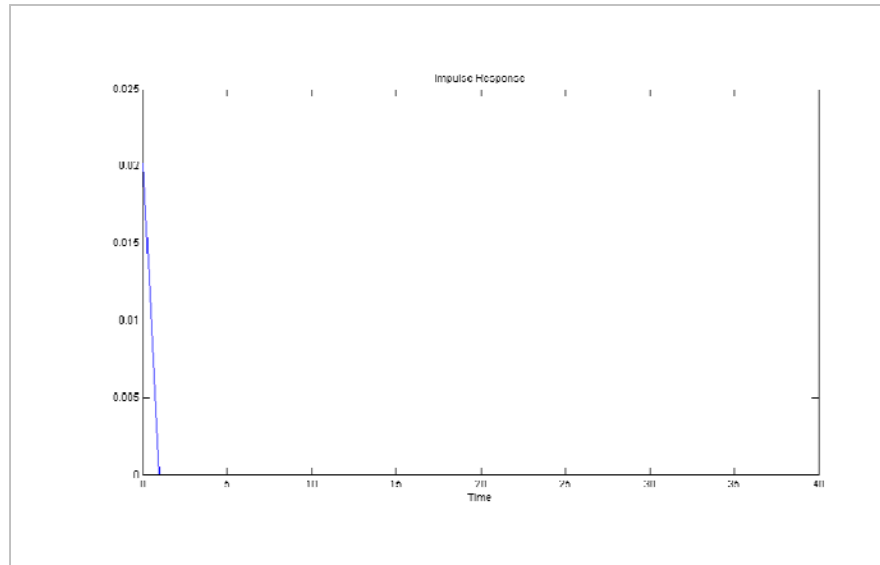


Fig. 5 Respuesta al impulso (Lazo de Presión).

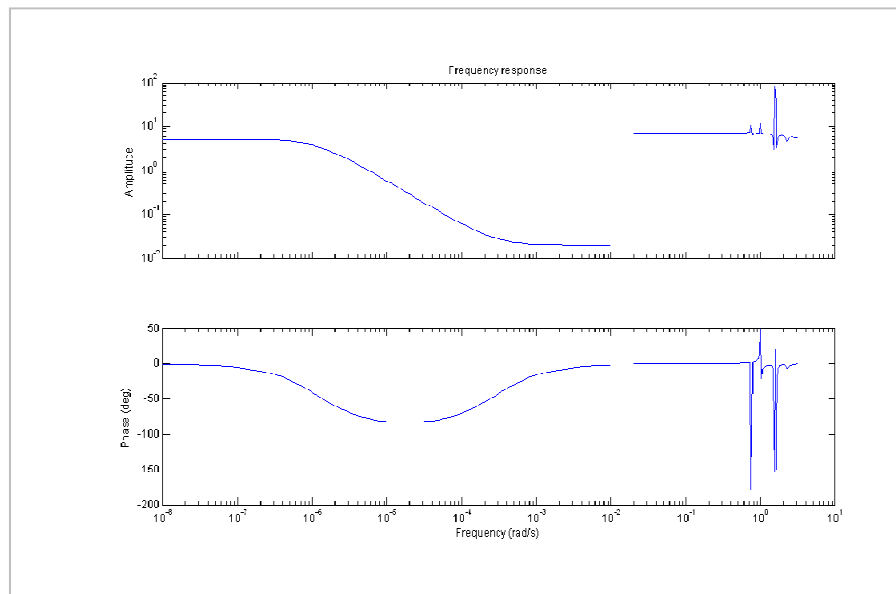


Fig. 6 Respuesta de frecuencia (Lazo de Presión).



Modelo teórico generalizado del separador gas-líquido horizontal

Para desarrollar el modelo físico-matemático del separador en caja gris, se debe disponer de un entendimiento de la física del sistema, esto significa que el mismo pueda ser representado mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. Se deben desarrollar dichas ecuaciones tanto para el lazo de nivel como el de presión.

Lazo de Nivel

Considerando el balance de masa de líquido en el separador se tiene

$$A \frac{dh_L(t)}{dt} = Q_{Le}(t) - Q_{Ls}(t) \quad (1)$$

Donde $dh_L(t)$ = Diferencial de nivel de líquido en el separador, A =  rea del separador, Q_{Le} = Caudal de líquido entrando al separador, Q_{Ls} = Caudal de líquido saliendo del separador.

El caudal de salida de líquido viene dado por la siguiente relación:

$$Q_{Ls}(t) = C_{v_L} V_{p_L}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{v_L}(t)}{G_L}} \quad (2)$$

Donde C_{v_L} = Coeficiente de la válvula de control de líquido. V_{p_L} = Posición de la válvula de control de líquido (porcentaje de apertura). ΔP_{v_L} = Ca da de presión a través de la válvula de control de líquido. G_L = Gravedad específica del líquido que fluye a través de la válvula.

Si consideramos que la dinámica de la válvula es de altísima rapidez en comparación con los otros componentes del sistema, (Nuñez 2007), la posición de la válvula de control de líquido se convierte en la acción de control del sistema, con lo cual se tiene el siguiente balance de masa

$$A \frac{dh_L(t)}{dt} = Q_{Le}(t) - C_{v_L} V_{p_L}(t) \quad (3)$$

Si adicionalmente se considera que la tasa de flujo de salida es la tasa promedio del flujo de entrada, (Nuñez, 2007), y calculando la misma a lo largo del período de la perturbación, se tiene la siguiente ecuación:

$$C_{v_L} V_{p_L}(t) \cong \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(C_{v_L} V_{p_L}(t) + A \frac{dh_L(t)}{dt} \right) dt \quad (4)$$



Aplicando la Transformada de Laplace se tiene:

$$V_{p_L}(s) = \frac{(1 - e^{-Ts})}{Ts} V_{p_L}(s) + KH_L(s) \quad (5)$$

El parámetro K está dado por:

$$K = \frac{-\lambda A}{TCv_L} \quad (6)$$

Donde λ = Parámetro de entonamiento fino.

Aplicando la siguiente aproximación de Padé de primer orden:

$$e^{-Ts} \cong \frac{2 + Ts}{2 - Ts} \quad (7)$$

Se obtiene el modelo teórico generalizado del separador gas-líquido, el cual se representa de la siguiente manera:

$$\frac{H_L(s)}{V_{p_L}(s)} = K \frac{T_c s + 1}{T_p s + 1} \quad (8)$$

Donde T_c = Parámetro asociado al cero del sistema, T_p = Parámetro asociado al polo del sistema.

Lazo de Presión

De forma análoga al lazo de nivel, se considera el balance de masa de gas, en esta oportunidad en el separador:

$$A \frac{dh_G(t)}{dt} = Q_{Ge}(t) - Q_{Gs}(t) \quad (9)$$

Donde $dh_G(t)$ = Diferencial de nivel de gas en el separador. A =  rea del separador. Q_{Ge} = Caudal de gas entrando al separador. Q_{Gs} = Caudal de gas saliendo del separador.

El caudal de salida de gas viene dado por la siguiente relación:



$$Q_{Gs}(t) = C_{vG} V_{pG}(t) P_1(t) \sqrt{\frac{520}{G_G T}} \operatorname{sen} \left[\left(\frac{3417}{C_1} \right) \sqrt{\frac{\Delta P_{VG}}{P_1(t)}} \right]_{\text{grad}} \quad (10)$$

Donde C_{vG} = Coeficiente de la válvula de control de gas. V_{pG} = Posición de la válvula de control de gas (porcentaje de apertura). G_G = Gravedad específica del gas que fluye a través de la válvula. ΔP_{VG} = Ca da de presión a través de la válvula de control de gas. P_1 = Presión en el separador horizontal.

Análogamente al lazo del nivel, se considera que la dinámica de la válvula de control de gas es de altísima rapidez en comparación con los otros componentes del sistema, y que la tasa de flujo de salida de gas, es igual a la tasa promedio del flujo de entrada. El modelo matemático generalizado del sistema para el lazo de presión es entonces:

$$\frac{H_G(s)}{V_{pG}(s)} = K \frac{T_c s + 1}{T_p s + 1} \quad (11)$$

Resultados y Análisis

Propiedades físicas de los fluidos

Las propiedades físicas de los fluidos o datos de laboratorio necesarios, fueron calculados ya sea a través de principios físicos fundamentales o a través de correlaciones empíricas (Giozza, 1983).

Las características del separador, líneas y fluidos se muestran en Apéndice A.

Lazos de Control

En este estudio se consideraron dos lazos de control: el lazo de control de nivel, ubicado en la descarga de líquido del separador; se puede apreciar que la variable de entrada en este lazo es el nivel de líquido dentro del separador; y la de salida la posición de la válvula de control de líquido.

Del mismo modo se puede apreciar el lazo de presión, ubicado en la descarga de gas. Con la presión del gas la posición de la válvula de control de gas como variables de entrada y salida respectivamente. Dichos lazos se representan en la Figura 9.

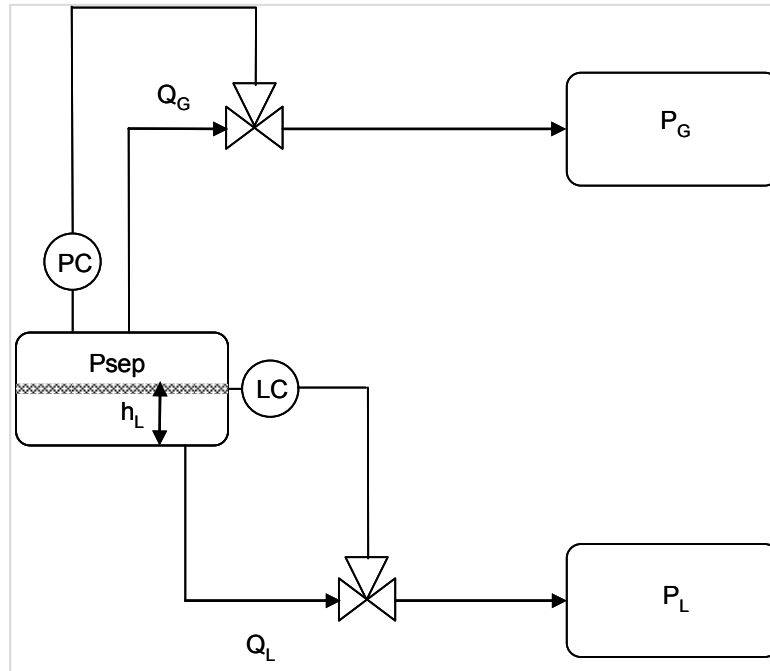


Fig. 7 Lazos de Control.

Modelo específico para un separador gas-líquido horizontal

El modelo en caja gris desarrollado a continuación, recoge la estructura matemática del modelo teórico generalizado del separador gas-líquido horizontal, y a partir de los objetos, métodos y funciones del Toolbox de Identificación de Sistemas de MATLAB®, se estiman los parámetros del modelo.

Lazo de Nivel

Conociendo la data de entrada y salida del sistema (Giozza,1983), que para el caso del lazo de nivel se trata del nivel de líquido dentro del separador y la posición de la válvula de control de líquido, y además conociendo el modelo matemático generalizado del lazo de nivel, se procede a la identificación del sistema en caja gris a través de la herramienta de identificación de sistemas de Matlab®, esta operación permitirá determinar los parámetros indicados en el modelo generalizado del sistema.

Seleccionando la ventana de modelos de procesos de la herramienta de identificación y colocando el modelo generalizado determinado, se obtiene el modelo matemático del sistema, el cual está dado por la siguiente función de transferencia:

$$HL(s) = K * \frac{1+Tz*s}{-----}$$

$$1+Tp1*s$$

Donde

$$K = 4.867$$

$$Tp1 = 1.7031e+006$$

$$Tz = 6997.2$$

Para los propósitos de verificar la veracidad del modelo determinado, se debe verificar su ajuste con respecto a la data original. El ajuste del modelo identificado con respecto al modelo representado por la data disponible es de 98,5 %, lo cual se puede evidenciar en la siguiente figura:

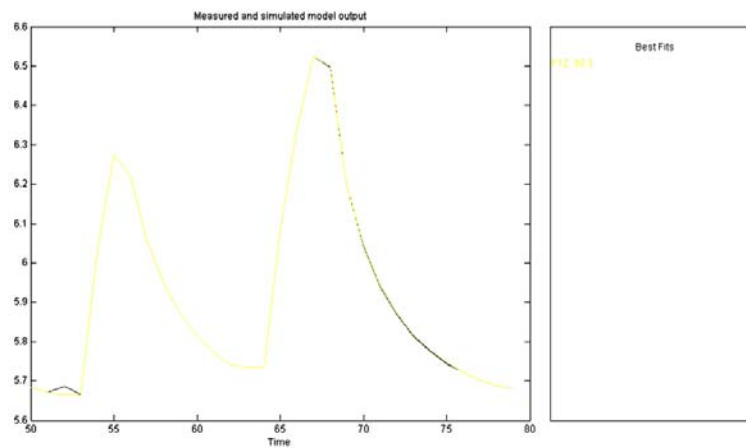


Fig. 8 Ajuste del modelo identificado con respecto al modelo representado por la data disponible (Lazo de Nivel).

Lazo de Presión

De manera similar al lazo de nivel se procede a la identificación del sistema en caja gris a través de la herramienta de identificación de sistemas de Matlab®, con lo cual se determinarán los parámetros indicados en el modelo generalizado del sistema.

A través de Matlab® se obtiene el modelo matemático del sistema dado por la siguiente función de transferencia:

$$1+Tz*s$$

$$P(s) = K * \frac{1}{1+Tp1*s}$$

$$1+Tp1*s$$

Donde

$$K = 5.0215$$

$$Tp1 = 8.7159e+005$$

$$Tz = 3504.3$$

Se verifica la veracidad del modelo determinado ya que su ajuste con respecto a la data original es de 95,94 %, esto se puede evidenciar en la siguiente figura:

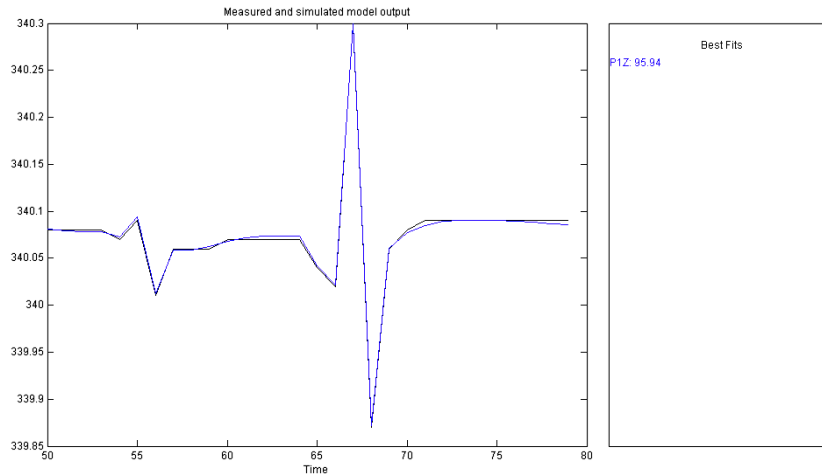


Fig. 9 Ajuste del Modelo Identificado con Respecto al Modelo Representado por la Data Disponible (Lazo de Presión).

Controlador óptimo para el separador

A continuación se describe el procedimiento utilizado en Matlab® para determinar el controlador óptimo del sistema:

Lazo de Nivel

a. Se introducen los parámetros de desempeño del sistema, esto es, introducir el numerador y denominador de su función de transferencia:

```
num=[ 3.4055e+004 4.8670]
```

```
den=[1703100 1]
```

b. Se determina la función de transferencia del sistema en tiempo discreto:

```
TF=tf(num,den,.1)
```

Transfer function:

$$34055 z + 4.867$$

$$1.703e006 z + 1$$

Sampling time: 0.1

c. Se coloca el sistema en ecuaciones de espacios de estado a través de:

```
[A,B,C,D]=tf2ss(num,den)
```



Donde

$$A = -5.8716e-007$$

$$B = 1$$

$$C = 2.8460e-006$$

$$D = 0.0200$$

d. Se resuelve la ecuación de Ricatti utilizando la representación auxiliar de espacios para obtener el la ley de control óptimo:

$$[L,P,E]=DLQR(A,B,eye,0.001)$$

Donde

L = Ley de Control.

P = Solución de la ecuación de Ricatti.

E = Autovalores de P.

Sus valores son:

$$L = -5.8658e-007$$

$$P = 1.0000$$

$$E = -5.8658e-010$$

e. La ley de control para el filtro de Kalman se determina resolviendo la ecuación de Ricatti para las transpuestas de A y C. La ley de control K_e será la transpuesta de L_e .

En este caso por tratarse de un sistema de primer orden las transpuestas coinciden con su valor original.

Lazo de Presión

Siguiendo el mismo procedimiento anterior para el lazo de presión se obtiene la Ley de Control, solución de la ecuación de Ricatti y autovalores de P para el lazo de presión, ellos son respectivamente:

$$L = -1.1462e-006$$

$$P = 1.0000$$

$$E = -1.1462e-009$$

Desempeño del controlador óptimo para el separador

Para comprobar la efectividad del controlador diseñado, es necesario realizar pruebas que permitan verificar su desempeño. Esto se realiza a través de simulaciones construidas a partir de la herramienta de simulación de Matlab®. Conociendo ya la ley de control óptimo, es posible entonces plantear los esquemas de los problemas de control óptimo:

a. Regulador Óptimo.

b. Seguimiento al Estado.

c. Filtro de Kalman.

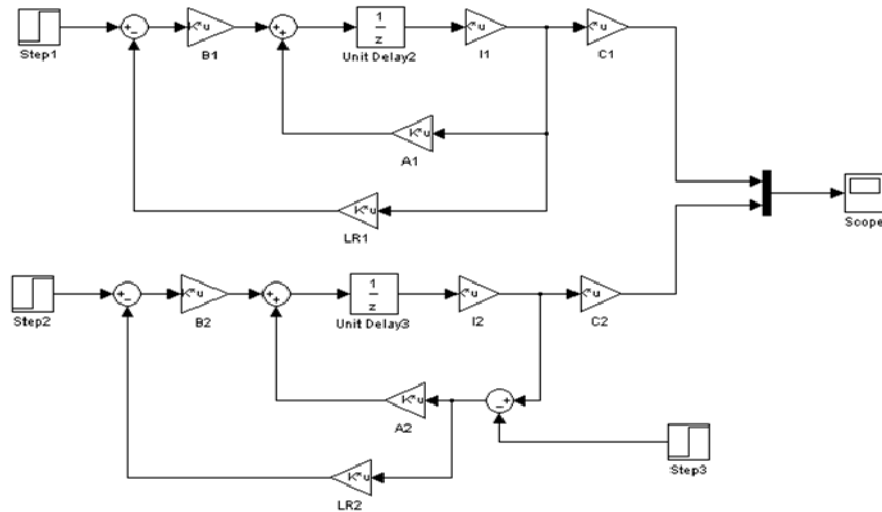


Fig. 10 Regulador óptimo y seguimiento al estado.

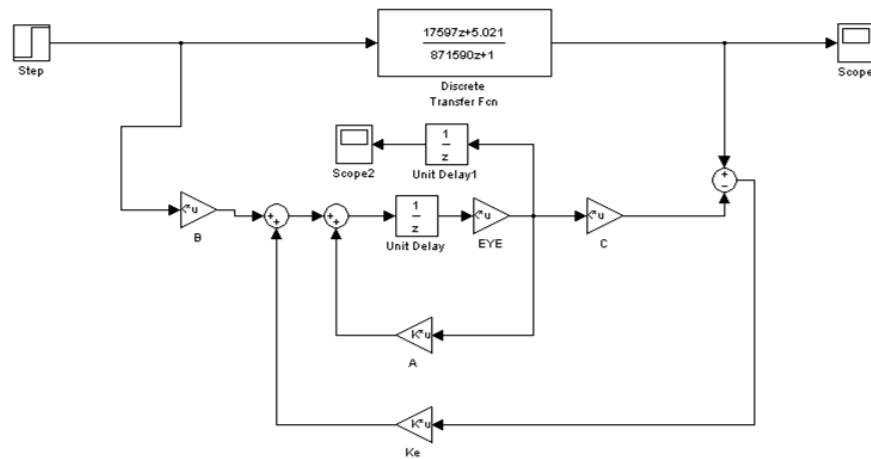


Fig. 11 El Filtro de Kalman.

Obteniendo los siguientes resultados:

Lazo de Nivel

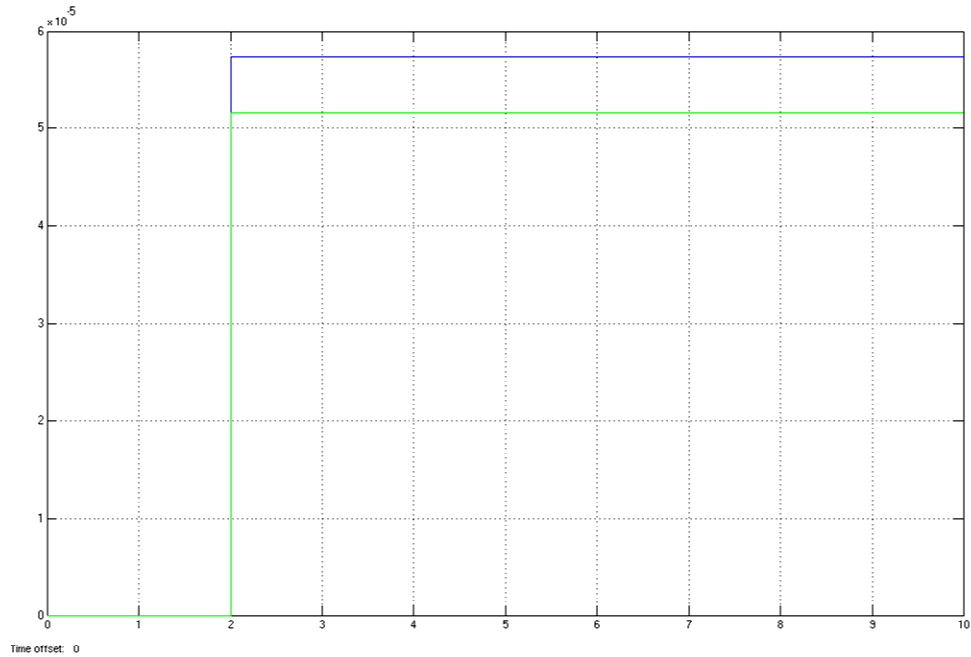


Fig. 12 Respuesta del sistema de control con regulador óptimo
(Color verde) y seguimiento al estado (color azul) (Lazo de Nivel).

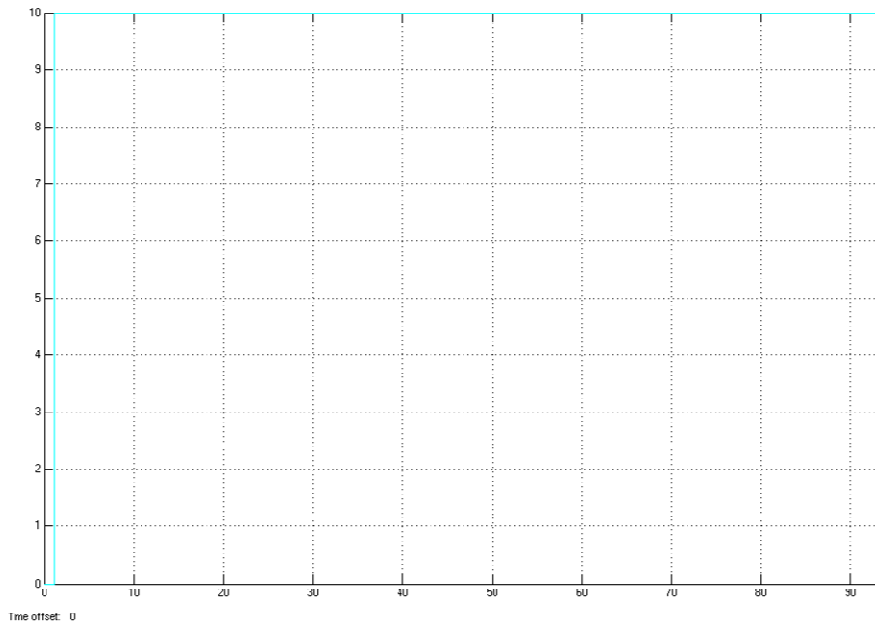


Fig. 13 Respuesta del sistema de control con filtro de Kalman (Lazo de Nivel).

Lazo de Presión

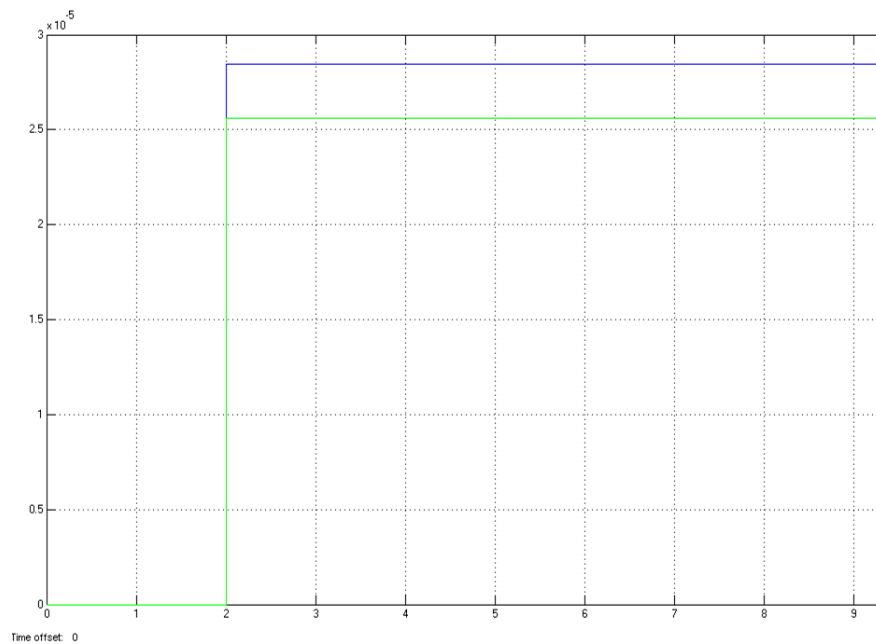


Fig. 14 Respuesta del sistema de control con regulador óptimo (Color verde) y seguimiento al estado (color azul) (Lazo de Presión).

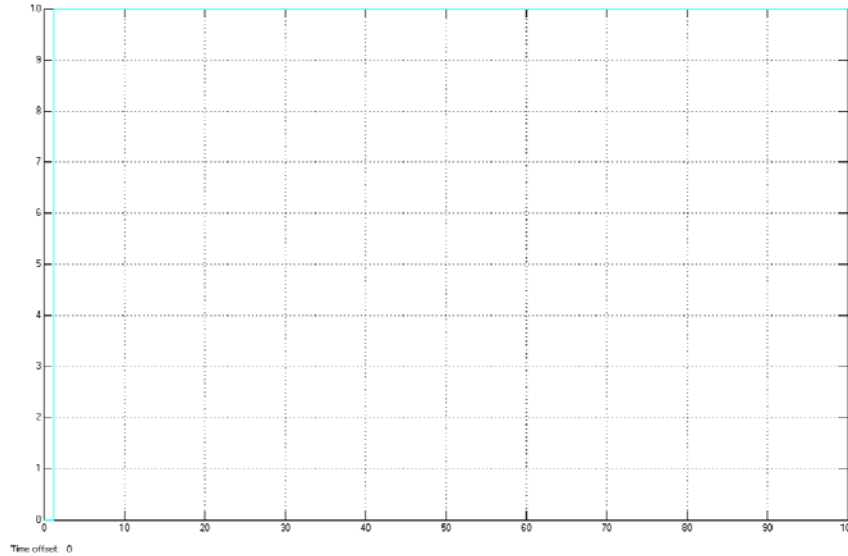


Fig. 15 Respuesta del sistema de control con filtro de Kalman
(Lazo de Presión).

Adicionalmente a los esquemas antes planteados se presenta una comparación entre los sistemas de control clásico y avanzado (óptimo), representados por un sistema de control PID y PI-Óptimo respectivamente.

La simulación correspondiente para los efectos de comparación referentes al lazo de nivel es la siguiente:

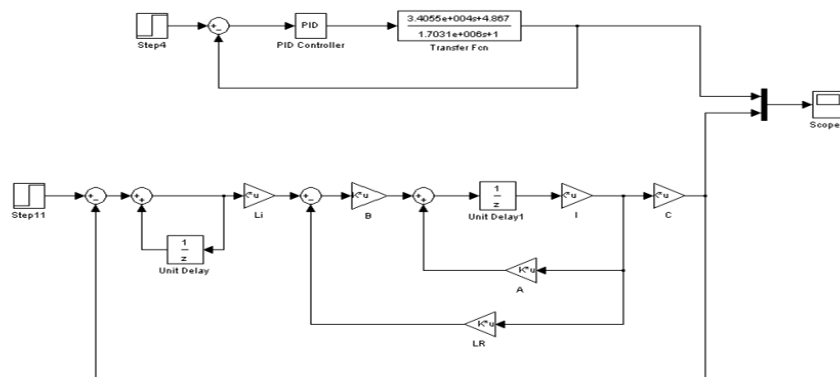


Fig. 16 Controladores PID y PI-Óptimo.

Obteniendo los siguientes resultados:

Lazo de Nivel

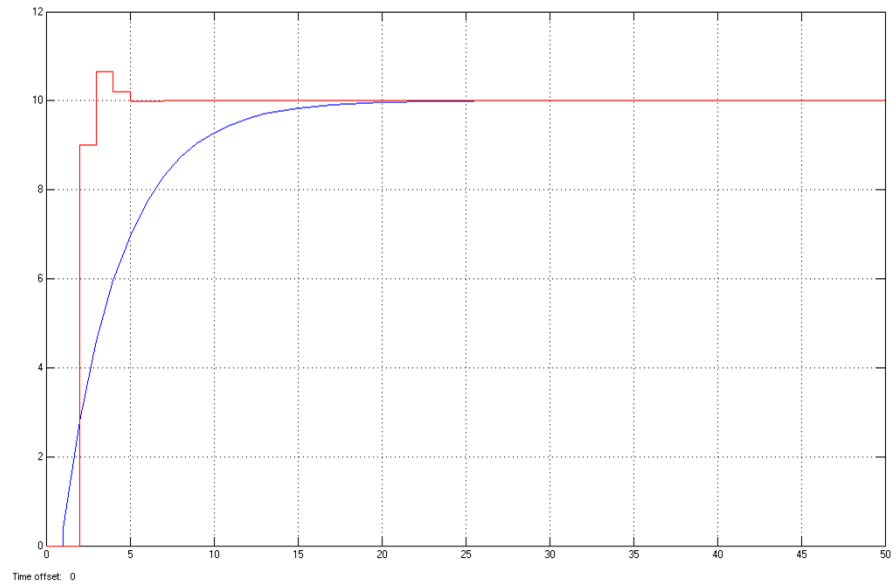


Fig. 17 Comparación de respuestas de sistemas con controladores PID (color azul) vs. PI-Óptimo (color rojo) (Lazo de Nivel).

Lazo de Presión

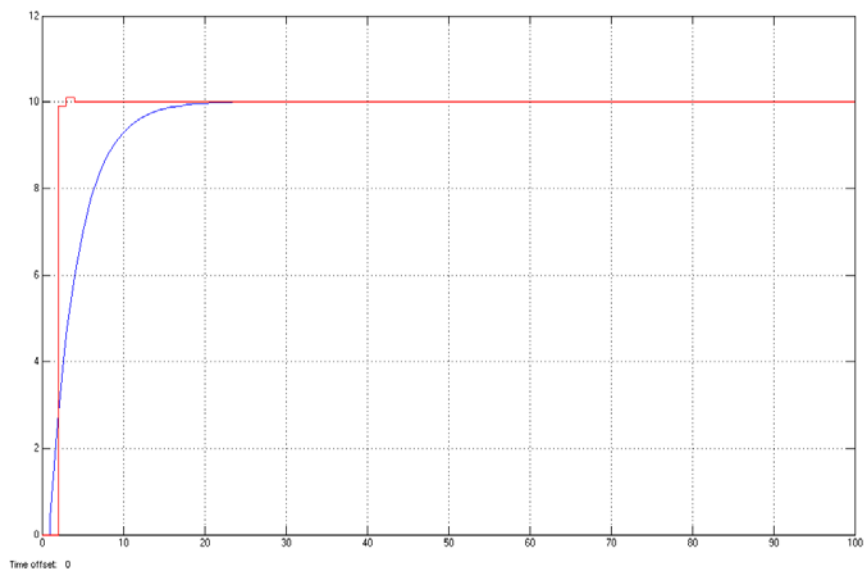


Fig. 18 Comparación de Respuestas de Sistemas con Controladores PID (color azul) vs. PI-Óptimo (color rojo) (Lazo de Presión).



Conclusiones

Existen numerosas variables en el proceso de separación, sin embargo, luego de ciertas consideraciones para determinar el modelo matemático del separador para el Lazo de Nivel, se determinó que dicho nivel se convierte en la salida del sistema, y el cambio de posición de la válvula de control de líquido, en la salida del mismo. En el lazo de presión, la posición de la válvula de control de gas es la variable de entrada, y la presión, la salida del sistema.

Otras consideraciones fueron fundamentales para el desarrollo del modelo teórico generalizado del separador: por una parte la dinámica de las válvulas de control son de altísima rapidez en comparación con los otros componentes del sistema (Núñez, 2007), entonces la posición de dichas válvulas se convierten en la acción de control del sistema, y por otro lado la tasa de flujo de salida de gas es igual a la tasa promedio del flujo de entrada (Núñez, 2007), simplificando el cálculo de la misma a lo largo del período de la perturbación.

El modelado de sistemas puede resultar una tarea compleja, en el caso particular de esta investigación, la estrategia de modelado en caja gris utilizada se adaptó correctamente a las exigencias del proceso de separación bajo condiciones de flujo intermitente.

El modelado en caja gris es sumamente útil y efectivo, en especial si se conocen los datos de entrada y salida del sistema y se tiene conocimiento del modelo matemático del proceso. Para lograr de manera coherente dicho modelo, hay que tomar muy en cuenta las potencialidades en cuanto a las diferentes configuraciones de modelos que pueden ser introducidos en la herramienta de identificación de sistemas de Matlab®, lo cual permite ahorro en tiempo de cálculo.

En el caso particular de esta investigación, los parámetros determinados permitieron obtener ajustes entre el modelo identificado y el modelo original del separador que superan el 98 % para el lazo de nivel y el 95 % para el lazo de presión.

A través de este trabajo se pudo observar la alta efectividad de las diferentes configuraciones de control óptimo representadas, esto se evidencia en cortos tiempos de respuesta a pesar de lo exigente del proceso controlado, en especial al utilizar la configuración del filtro de Kalman.

Los controladores diseñados presentaron comportamiento similar bajo las distintas configuraciones del control óptimo, se diferencian mayormente en su curva de atenuación antes de llegar a la estabilidad del sistema.

Después de comparar los sistemas de control PID clásico y PI-Óptimo, permite verificar la superioridad de este último, sin embargo el controlador PID mostró un comportamiento satisfactorio.



Referencias Bibliográficas

- Aboukheir, H. (2006). **Sistemas de Control II. Maracaibo.** Universidad Rafael Belloso Chac n. Facultad de Ingeniería.
- Adeniyi, O. (2004). **Development of Model and Simulation of a Two-Phase, Gas-Liquid Horizontal Separator.** Nigeria. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Federal de Tecnología.
- Butterworth, D. et al. (1977). **Two Phase Flow and Heat Transfer.** Oxford. Oxford University Press.
- Cáliz, L. (2006). **Sistema de Control Predictivo para Separadores no Convencionales.** Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Magíster en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos. Universidad Rafael Belloso Chac n. Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. Decanato de Investigación y Postgrado.
- Dhulesia, H y Hustvedt, E. (1993). **Measurement and Analysis of Slug Characteristics in Multiphase Pipelines. Multiphase Production.** Cannes. Mechanical Engineering Publications. (179-191).
- Fabre, J. et al. (1993). **Evolution of Slug Flow y Long Pipes. Multiphase Production.** Cannes. Mechanical Engineering Publications. (165-177).
- Genceli, H. (1985). **Dynamic Simulation of Slug Catcher Behavior.** Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Magíster en la Disciplina de Ingeniería de Petróleo. Universidad de Tulsa. Proyecto de Flujo de Fluidos.
- Giozza, W. (1983). **Simulation of Gas-Oil Separator Behavior under Slug Flow Conditions.** Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Magíster en la disciplina de Ingeniería de Petróleo. Universidad de Tulsa. Proyecto de Flujo de Fluidos.
- G mez, V. (2000). **Flujo Multif sico en Tuberías.** Caracas. Centro de Formación de Petróleos de Venezuela y sus Empresas Filiales.
- Grupo de Estudios **Norsk Hydro.** (2007). Slug Flow. Londres.
- Hernández y otros (2006). **Metodología de la Investigación.** México. McGraw-Hill.
- Ljung, L. (1987). **System Identification: Theory for the Users.** New Jersey. Prentice Hall.
- Luyben, W. (1990). **Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers.** New York. McGraw-Hill.



- McDonald, K. y McAvoy, T. (1986). **Optimal Averaging Level Control**. AIChE Journal, 32, 75-86.
- Norma PDVSA MDP-03-S-01. (1995). **Manual de Diseño de Proceso**. Principios Básicos. Los Teques.
- Norma PDVSA MDP-03-S-03. (1995). **Manual de Diseño de Proceso**. Separadores Líquido-Vapor. Los Teques.
- Núñez, G. (2007). **A Practical Strategy for Controlling Flow Oscillations in Surge Tanks**. Río de Janeiro. Centro de Investigación de PETROBRAS.
- Ogata, K. (1998). **Ingeniería de Control Moderna**. México. Prentice Hall Hispanoamericana.
- Ogata, K. (1996). **Sistemas de Control en Tiempo Discreto**. México. Prentice Hall Hispanoamericana.
- Skogestad, S. (2003). **Lower Limit on Controller Gain for Acceptable Disturbance Rejection**. Hong Kong. Simposio Internacional de Control Avanzado y Procesos Químicos.
- Smith, C. y Corripio, A. (1991). **Control Automático de Procesos: Teoría y Práctica**. México. Limusa Noriega.
- Stoorkaas, E. (2005). **Stabilizing Control and Controllability: Control Solutions To Avoid Slug Flow In Pipeline-Riser Systems**. Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Doctor en Ingeniería. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología. Departamento de Ingeniería Química.
- Tamayo y Tamayo, M. (2001). **El Proceso de la Investigación Científica**. México. Limusa Noriega.
- Wang, S. Et al. (2000). **Dynamic Simulation, Experimental Investigation and Control System Design of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators**. Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Doctor en la Disciplina de Ingeniería de Petróleo. Universidad de Tulsa. Proyecto de Flujo de Fluidos.



APÉNDICE A: Características del Separador, Líneas y Fluidos.

CARACTERÍSTICAS DEL SEPARADOR	
Diámetro	12,00 ft
Longitud	60,00 ft
Presión (set point)	340,00 psig
Nivel (set point)	6,00 ft
Temperatura	134,00 °F

CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA	
Diámetro	23,12 in
Rugosidad	0,000062 ft

CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE DESCARGA DE LÍQUIDO	
Diámetro Interno	24,00 in
Longitud	1000,00 ft
Presión de Descarga	120,00 psig

CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE DESCARGA DE GAS	
Diámetro Interno	28,00 in
Longitud	1000,00 ft
Presión de Descarga	120,00 psig



CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

Tasa de Flujo de Crudo	164581,00 STBO/D
Tasa de Flujo de Agua	6250,00 STBW/D
Razón Crudo-Gas	637,80 SCF/STBO
Grado API del Crudo	28,50
Gravedad Específica del Agua	1,10
Gravedad Específica del Gas	0,78

CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO INTERMITENTE

Holdup de Líquido en el Tapón	0,53
Holdup de Líquido en la Burbuja	0,13
Velocidad Superficial de Líquido	4,04 ft/s
Velocidad Superficial de Gas	16,43 ft/s

CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO DENTRO DEL SEPARADOR

Densidad de Líquido	53,2639 LBM/Cu.ft
Densidad de Gas	1,2801 LBM/Cu.ft
Viscosidad del Líquido	4,5529 CP
Viscosidad del Gas	0,012 CP