

## **MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN TIEMPO CONTINUO DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN BIFÁSICA V-41101A/B**

### **MODELING AND SIMULATION ON CONTINUOUS TIME OF THE BIPHASIC SEPARATION SYSTEM V-41101A/B**

Sergio Velásquez<sup>1</sup>, Ángela Díaz<sup>1</sup>, Axel Rozas<sup>2</sup>, Ronny Velásquez<sup>1</sup>, Henry Romero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación de las Redes Neuronales y la Robótica CIRNAR-UNEXPO

<sup>2</sup> PDVSA-Petrourica S.A<sup>2</sup>

Ciudad Guayana, Bolívar 8050 Venezuela.  
[sergiovelasquez@gmail.com](mailto:sergiovelasquez@gmail.com)

Recibido: Mayo 2015 Aceptado: Octubre 2015

---

#### **RESUMEN**

Este artículo presenta el modelado y simulación en tiempo continuo de los lazos de control del sistema de separación bifásica V-41101A/B del Centro de Procesamiento de Fluidos de la empresa mixta Petrourica S.A, la cual se encarga de la extracción y procesamiento de hidrocarburos en el Bloque Junín 4 de la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO). Haciendo uso de una investigación proyectiva, se desarrolló el modelado matemático de los lazos de control para el separador bifásico horizontal, para luego ser implementado en Matlab, específicamente haciendo uso de la herramienta Simulink. El modelo implementado permitió estimar el comportamiento del sistema ante perturbaciones de la composición de fluido multifásico proveniente del campo, dando como resultado lazos de control totalmente estable con controladores PID de respuestas rápidas, bajo error de estado estable y sobreimpulso menores al 10%.

Palabras Clave: Separador Bifásico Horizontal, Matlab, Simulink, Controlador PID, Modelado Matemático

---

#### **ABSTRACT**

This paper presents the modeling and simulation on continuous-time of the control loops of the biphasic separation system V-41101A/B of Processing Fluids Centre of the mixed company Petrourica S.A, which is responsible of the extraction and processing of hydrocarbons on the Junin 4 block for the Orinoco Oil Belt (OOB). Using a projective research, mathematical models of control loops for the Horizontal Biphasic Separator were developed for a future implementation on Matlab using the Simulink resource. The implemented models allowed the estimation of the system behavior in front a perturbation of fluids composition from field, giving as result a stable control loops with PID controllers of fast responses, low error steady state and overshoot less than 10%.

Keywords: Horizontal Biphasic Separator, Matlab, Simulink, Simulation, PID Controller, Mathematical Model.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa mixta Petrourica S.A, está encargada del diseño e implementación de las facilidades para la extracción y procesamiento de hidrocarburos en el Bloque Junín 4 de la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO), por tal motivo y debido a su reciente formación, la empresa en la actualidad se encuentra en el diseño de la Ingeniería básica del centro de procesamiento de fluidos (CPF) para procesar 400 MBPD de crudo extrapesado que será implementado a través de un contrato tipo IPC (Ingeniería, Procura y Construcción).

En base a esto se ha planteado realizar un modelado y simulación de una parte del tren I para estimar el comportamiento del sistema de recepción y tratamiento de fluido ante perturbaciones de la composición de fluido multifásico proveniente del campo, específicamente el sistema de separación bifásica, el cual está conformado por dos desgasificadores de entrada, o como también se les denomina separadores bifásicos horizontales (V-41101A/B).

El flujo de crudo mezclado proveniente de los sistemas de bombeo multifásicos de las macollas del campo según el plano PFD, se distribuye entre los desgasificadores de entrada (V-41101 A/B) en el tren I encargados de extraer el gas de producción del fluido multifásico, estos según el documento de Filosofía de Control, Operación y Protección del proceso CPF trabajarán a una presión de 413kPa (60psig).

Dicha presión es regulada mediante los controladores PIC-1005 y PIC-1012, los cuales actuarán sobre las válvulas de control PV-1005A/B y PV-1012A/B (Según diagramas P&ID). Estas válvulas trabajan en control de rango dividido, es decir, la válvula de control PV-1005A / PV-1012A estarán cerradas y la válvula de control PV-1005B / PV-1012B estarán modulando su apertura, manteniendo la presión de operación en los separadores y enviando gas excedente a los separadores de gas mixto bajo condiciones normales de operación. Cuando la presión cambia bruscamente y las válvulas PV-1005B y PV-1012B no pueden ejercer el control debido a que se encuentran al 100% de su apertura, las válvulas de control PV-1005A y PV-1012A comenzarán a modular su apertura enviando parte del gas de producción al mechorrio hasta restituir la presión normal.

En función a esto se establece dos lazos de control, los cuales en conjunto manejan el control de la presión para los tanques desgasificadores, el primer lazo esta dirigido a la válvula PV-1005B, en la que se asume un margen de operación desde 60psig hasta 93,74psig, estos valores representan un porcentaje de apertura de la válvula del 0% y 100%. El segundo lazo esta diseñado para la válvula PV-1005A, la cual mantendrá un margen de operación desde 93,74 psig (0% de apertura) hasta 127,6psig (100% de apertura).

Cabe destacar que los lazos de control son exactamente iguales para ambos desgasificadores, por lo que se desarrollaron los lazos en función de los TAG del primer desgasificador. La Figura 1 representa en términos generales los lazos de control de presión en el desgasificador de entrada.

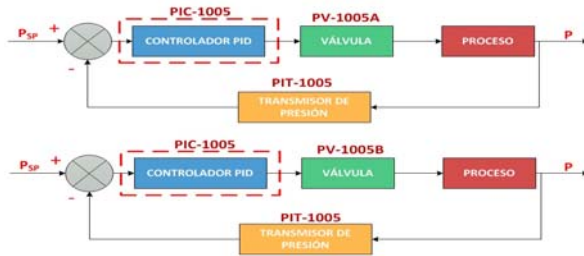


Figura 1. Lazos de Control General de Presión del Desgasificador de Entrada

El nivel de los desgasificadores de entrada según el diagrama P&ID se controla a través de los controladores LIC-1002 y LIC-1006 y las válvulas de control de nivel LV-1002A/B y LV-1006A/B, al igual que las válvulas de presión estas válvulas trabajarán a margen dividido, es decir, la válvula LV-1002A /LV-1006A estarán cerradas mientras que la válvula LV-1002B/LV-1006B modulan su apertura ante condiciones de nivel nominales, enviando la emulsión al resto del tren. Cuando el nivel sube bruscamente y la válvula LV-1002B / LV-1006B no pueda mantener el control debido a que su apertura se encuentre a un 100%, la válvula LV-1002A / LV-1006B comenzará a modular su apertura para liberar el exceso en el nivel de emulsión contenido en en desgasificador de entrada.

Debido a este rango dividido, se diseñan dos lazos de control (uno para cada válvula) encargados del control del nivel del separador bifásico horizontal. La válvula LV-1002B/LV-1006B mantiene un margen de operación desde 1,24ft hasta 1,75ft, dichos valores representan un 0% y 100% de apertura de la válvula respectivamente. La válvula LV-1002A/LV-1006B trabajan a un margen desde 1,75ft (0% de apertura) hasta 3,50ft (100% de apertura). Entendido esto se puede establecer el lazo de control de nivel general representado en la Figura 2

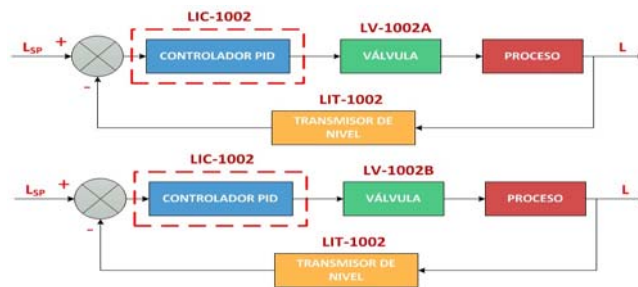


Figura 2. Lazos de Control General de Nivel del Desgasificador de Entrada

## II. DESARROLLO

El objetivo principal de la investigación desarrollada es el de modelar y simular el sistema de separación bifásica (V-41101A/B), por lo que como su objetivo lo indica el primer paso es desarrollar todas las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento del equipo.

Como se explicó en la sección introducción, los separadores bifásicos horizontales son controlados a través de cuatro (4) lazos cerrados. Los primeros dos (2) ejercen

control sobre el nivel de emulsión y el resto sobre la presión del equipo. Es importante acotar que los lazos de control fueron desarrollados con los TAG del separador bifásico horizontal V-41101A. En función a esto el desarrollo matemático se realizó para cada lazo de control. Veamos a continuación los detalles.

**LAZOS DE CONTROL DE NIVEL**

Los lazos de control de nivel se han dividido por bloques, a fin de abordar el desarrollo de cada una de las funciones de transferencias de cada uno de los equipos e instrumentos en forma individual. En la Figura 3 se muestra los lazos de control identificando cada instrumento con un número de bloque, esto se realizó para asegurar el entendimiento por parte del lector

Cabe destacar que los lazos de control de nivel de cada válvula en modelado matemático son exactamente iguales, sólo cambia el Set Point de cada lazo y los valores a sustituir en algunas de las fórmulas.

**1.1. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA**

A continuación se desarrollan las funciones de transferencia que representan el modelo matemático en el orden de los bloques mostrados en la Figura 3.

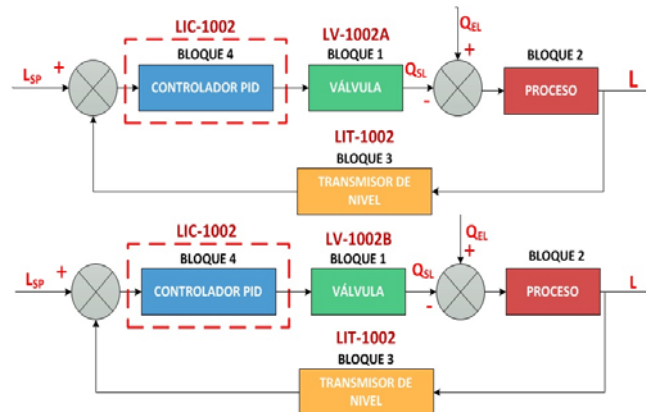


Figura 3. Lazos de Control de Nivel del Separador Bifásico Horizontal Detallado por Bloques

**1.1.1. Bloque 1 Válvulas de Control de Nivel LV-1002A/B**

El desarrollo de la función de transferencia de estos bloques se realiza en forma simultánea ya que ambas válvulas según los datos de las características físicas y de proceso especificados en el documento: Control Valve Datasheets desarrollado por PDVSA Petrouirica y SNC LAVALIN (2013), son idénticas.

El bloque que representa las válvulas es dividido en cuatro (4) sub-bloques, encargados de relacionar la entrada en corriente de la válvula proveniente del controlador con la salida de la válvula representada por el caudal de líquido de salida. Estos sub-bloques se pueden apreciar en la figura4.



Figura 4. Sub-Bloques de las Válvulas de Control de Nivel LV-1002A/B

### 1.1.2.Sub-Bloque 1.1

El sub-bloque 1.1 corresponde a un conversor I/P, encargado de transformar los valores de corriente provenientes del controlador en valores de presión para que el actuador neumático de la válvula pueda efectuar la apertura o cierre de la misma.

La corriente que sale del controlador varía de (4 a 20) mA, esta señal es convertida a un margen de (3 a 15) psi que es el margen de presión con el que trabaja el actuador, estos valores proporcionan la entrada y salida del conversor I/P. En base a estos valores Rentel (2009) define la función de transferencia que rige un conversor I/P como una ganancia de la siguiente forma:

$$\frac{P(s)}{I(s)} = 0,75 \quad (1.1)$$

Siendo esta ecuación (1.1) la función de transferencia del bloque 1.1 de la válvula.

### 1.1.3.Sub-Bloque 1.2

Este sub-bloque relaciona la presión aplicada por el actuador con el porcentaje de apertura de la válvula. Las válvulas LV-1002A/B según el P&ID del proceso son válvulas a falla cerrada (FC) o como se denomina en algunos casos válvulas de aire para abrir (AA).

Genceli (1985) define la ecuación diferencial de una válvula a falla cerrada en función a la presión del actuador y el porcentaje de apertura como:

$$\frac{d\%x}{dt} = \left( P - \frac{12}{100}\%x - 15 \right) \frac{100}{12\tau_v} \quad (1.2)$$

Llevando esta ecuación a variables de desviación, despejando y transformando a laplace se obtiene:

$$\frac{\%x(s)}{P(s)} = \frac{8,33}{\tau_v s + 1} \quad (1.3)$$

Dónde:

$\tau_v$  = Tiempo de respuesta del actuador.

El valor de  $\tau_p$  es suministrado por los fabricantes de los actuadores neumáticos, para este caso la empresa ha escogido actuador neumático modelo 3760 de la marca Samson ya que se considera que se adapta con mayor eficiencia a los requerimientos de las normas PDVSA. Este valor es de 1s.

#### 1.1.1.3 Sub-Bloque 1.3

El bloque 1.3 tiene como entrada el porcentaje de apertura de la válvula y salida el coeficiente de caudal  $C_v$ , debido a la condición de linealidad de las válvulas entre estos valores que explica Corripio & Smith (1997) en su libro Principles and Practice of Automatic Process Control en la página 211, la función de transferencia de este bloque es expresada como una ganancia de la siguiente forma:

$$\frac{C_{v(s)}}{\%x(s)} = \frac{C_{vmáx}}{100} \quad (1.4)$$

El valor de  $C_{vmáx}$  de las válvulas LV-1002A/B es suministrado por el documento: Control Valve Datasheets desarrollado por PDVSA Petrourica y SNC LAVALIN (2013) y tiene un valor de 253.

#### 1.1.1.4 Sub-Bloque 1.4

El último bloque de la función de transferencia total de la válvula está representado por la relación entre el coeficiente de caudal  $C_v$  y el caudal de líquido de emulsión que representa la salida de la válvula. Esta función de transferencia para válvulas de control de líquido, está establecida por la norma ISA S75.01 y se expresa como:

$$\frac{Q_{sL(s)}}{C_{v(s)}} = 0.02228 \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma_L}} \quad (1.5)$$

Dónde:

$\Delta P$ = Caída de presión de la válvula en psi

$\gamma_L$ = Gravedad específica del líquido

Estos valores son suministrados por el documento Control Valve Datasheets desarrollado por PDVSA Petrourica y SNC LAVALIN (2013).  $\Delta P$  tiene un valor de 42,06 psi y  $\gamma_L$  de 0,99

Para determinar la función de transferencia general del bloque que representa las válvulas LV-1002A/B se sustituye todos los valores conocidos y se hace uso de las propiedades algebraicas de los diagramas de bloques para unir los bloques 1.1,1.2,1.3 y 1.4. Este proceso dio como resultado la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{sL(s)}}{I(s)} = \frac{2,29}{s + 1} \quad (1.6)$$

1.1.4. Bloque 2 Proceso

El bloque de proceso tiene como entrada una sumatoria para la inserción de las perturbaciones, el cual a su vez determina la tasa de caudal de líquido que maneja el proceso. La función del bloque de proceso es relacionar la entrada representada por la tasa de caudal de líquido con la altura de nivel de líquido que será la variable a medir por el transmisor.

Para eso el bloque del proceso se representa por dos bloques como se representa en Figura 5 el primero relaciona el caudal con el volumen, y el segundo el volumen con la altura de líquido que este ocupa.

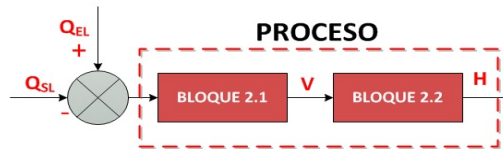


Figura 5. Sub-bloques del Proceso

1.1.2.1 Bloque 2.1

El caudal teóricamente es la derivada en función del tiempo del volumen, por lo que desarrollando dicha ecuación obtiene:

$$\frac{dV_l}{dt} = Q_{EL} - Q_{SL} \quad (1.7)$$

Llevando la ecuación a variables, transformando dicha ecuación a Laplace y despejando para obtener la relación entrada salida se obtiene en la ecuación la función de transferencia del bloque 2.1 que resulta de la siguiente forma:

$$\frac{V_{L(s)}}{Q_{EL(s)} - Q_{SL(s)}} = \frac{1}{s} \quad (1.8)$$

1.1.2.2 Bloque 2.2

Como se mencionó anteriormente este bloque tiene la función de establecer la relación del volumen con la altura del nivel de líquido. El separador bifásico es un tanque de forma cilíndrica dispuesto en forma horizontal, por lo que el volumen se puede determinar en función de la variación de la altura de líquido visto desde el diámetro de la circunferencia que este dibuja, esto puede observarse en forma visual en la Figura 6.

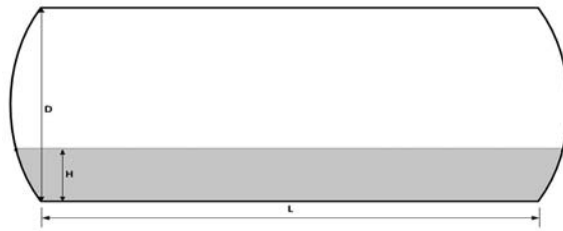


Figura 6. Forma del Separador Bifásico Horizontal

El volumen de un tanque horizontal se define en la siguiente ecuación como:

$$V = L \left( R^2 \cos^{-1} \left( \frac{R-H}{R} \right) - (R-H) \sqrt{2RH - H^2} \right) \quad (1.9)$$

Puesto que la ecuación (1.9) no es lineal, se procede a linealizarla a través de la herramienta MATLAB en su aplicación Curve Fitting Tool. Para esto se primero se graficó la ecuación no lineal otorgándole valores correspondientes a las altura máxima y mínima que ocupará la columna de líquido, estos valores corresponden en su mínimo a cero (0) y en su máximo al diámetro del separador.

La gráfica de la ecuación no lineal se observa en la Figura 7 en color negro, y la recta linealizada está en la misma figura en color azul, es importante acotar que la aplicación utilizó el método de linealización polinomial de primer orden

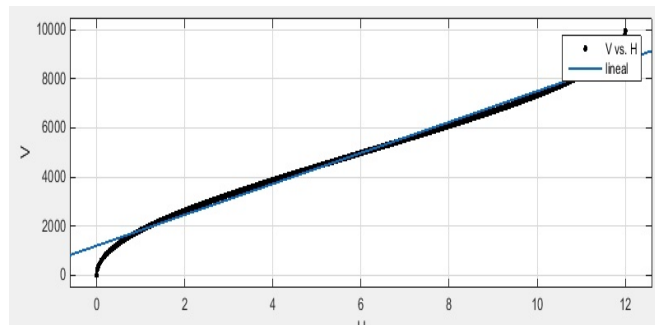


Figura 7. Gráfica de la Ecuación del Volumen en Función de la Altura del Separador Bifásico Horizontal Linealizada

Esta función lineal tiene un porcentaje de error máximo del 5% para los valores máximos y mínimos de altura de nivel de líquido, es importante señalar que este porcentaje de error se presenta para valores menores a 0,8ft y valores mayores a 12ft aproximadamente. Debido a que experimentalmente el nivel más bajo que ocupará la emulsión es 0,23m y el nivel más alto 2,470m, este error no influirá de manera negativa en el control.

La ecuación linealizada otorgada por MATLAB tiene la forma de:



$$V = AH + B \quad (1.10)$$

Sustituyendo las variables por variables dependientes del tiempo, expresándolas en variables de desviación y llevándolas a Laplace se tiene:

$$\frac{H(s)}{V(s)} = \frac{1}{A} \quad (1.11)$$

Esta última ecuación representa la función de transferencia del bloque 2.2.

Usando de nuevo las propiedades algebraicas de los diagramas de bloques para unir los bloques 2.1 y 2.2 se tiene que la función de transferencia del proceso en general es:

$$G_{p(s)} = \frac{1}{As} \quad (1.12)$$

De la ecuación (1.12) se sustituyen los valores conocidos tales como la longitud y radio del separador bifásico suministrado por la hoja de datos del equipo, cuyo nombre del documento es: “*Mechanical Specification Sheet- Inlet Degasser*” suministrado y desarrollado por PDVSA Petrourica y SNC LAVALIN (2013), estos valores son para el radio R 6ft, longitud L 87,99ft y A 629,7. Esta sustitución determina la función de transferencia del proceso como:

$$G_{p(s)} = \frac{0,00158}{s} \quad (1.13)$$

### 1.1.3 Bloque 3 Transmisor de Nivel LIT-1002

Corripio y Smith (1997) determinan que la función de transferencia de un sensor/transmisor relaciona su señal de salida con la señal de entrada (la variable del proceso), por lo que la forma mas sencilla de representar dicha función es a través de una ecuación de primer orden de la siguiente forma:

$$H(s) = \frac{K_T}{\tau S + 1} \quad (1.14)$$

Donde  $K_T$  es la ganancia del transmisor y  $\tau$  es la constante de tiempo del transmisor.

La ganancia del transmisor equivale a 1 y la constante de tiempo ha sido determinado por el catalogo de los transmisores de marca Rosemount (Marca determinada por PDVSA Petrourica) como 0,1s. Sustituyendo estos valores se tiene:

$$H(s) = \frac{1}{0,1s + 1} \quad (1.15)$$

## 2. LAZOS DE PRESIÓN

## CONTROL DE

Al igual que el lazo de control de nivel, los lazos de control de presión se han dividido en bloques para abordar el modelado matemático en forma sencilla. El desarrollo del modelado matemático para el lazo de control de la válvula PV-1005A y PV-1005B son exactamente iguales en líneas generales, las diferencias recaen en el Set Point de cada lazo, y algunos valores otorgados por las hojas de datos en las válvulas que serán sustituidos en las fórmulas y ecuaciones correspondientes. La Figura 8 muestra los lazos de control dividido en bloques.

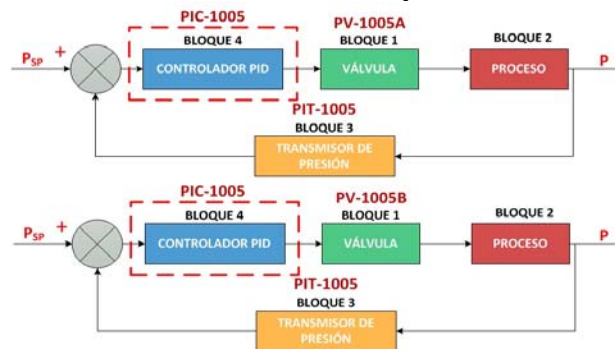


Figura 8. Lazos de Control de Presión del Separador Bifásico Horizontal Detallado por Bloques

### 2.1. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

En el siguiente apartado se desarrollan las funciones de transferencia de los bloques especificados en la Figura 8.

#### 2.1.1. Bloque 1 Válvulas de Control de Presión PV-1005A/B

Al igual que con las válvulas de control de nivel, las válvulas de control de presión se dividen en cuatro (4) bloques que cumplen exactamente las mismas funciones. Los bloques 1.1 y 1.2 son exactamente iguales a los bloques 1.1 y 1.2 de las válvulas de control de nivel, las variaciones se presentan en las características físicas y de proceso que se utilizan en los valores de los bloques 1.3 y 1.4.

##### 2.1.1.1 Bloques 1.1 y 1.2

Las funciones de transferencia son exactamente iguales a las mencionadas en las ecuaciones (1.1) y (1.3).

##### 2.1.1.2 Bloque 1.3

Este bloque presenta la misma forma y ecuaciones del bloque 1.3 de las válvulas de control de nivel, pero con la sustitución de su valor de  $c_{vmax}$  otorgado por el documento: Control Valve Datasheets desarrollado por PDVSA Petrouirica y SNC LAVALIN (2013), estos valores son 495 para la válvula A y 871 para la válvula B.

## 2.1.1.3 Bloques 1.4

Esta función de transferencia al igual que para válvulas de control de líquido, está establecida por la norma ISA S75.01 para las válvulas de control de gas como:

$$\frac{Q_{sL}(s)}{C_v(s)} = 0,015740P_1Y \sqrt{\frac{X}{\gamma_G T_1 Z}} \quad (1.16)$$

Dónde:

$P_1$ = Presión de entrada (psia) (psi+14,7)

$Y$  = Factor de Expansión

$X = \Delta P/P_1$

$T_1$ = Temperatura de entrada (°R)

$Z$ = Factor de Compresibilidad

$\gamma_G$ = Gravedad específica del gas

Los valores de  $P_1$ ,  $Z$ ,  $T_1$ ,  $\Delta P$  y  $\gamma_G$  son suministrados por el documento Control Valve Datasheets desarrollado por PDVSA Petrouirica y SNC LAVALIN (2013).  $P_1$  equivale a 56,84 psi para la válvula A y 59,85 para la B,  $Z$  es igual a 0,99,  $T_1$  corresponde 556,8 °R,  $\Delta P$  es igual a 55,52psi para la válvula A y 12,28psi para la válvula B y  $\gamma_G$  es igual a 3,45.

Por último usando las propiedades algebraicas de los diagramas de bloques para unir los bloques 1.1,1.2,1.3 y 1.4, se determina el bloque final que representan las válvulas PV-1005A/B.

Válvula PV-1005A

$$\frac{Q_{sG}(s)}{I(s)} = \frac{0,83}{s + 1} \quad (1.17)$$

Válvula PV-1005B

$$\frac{Q_{sG}(s)}{I(s)} = \frac{0,97}{s + 1} \quad (1.18)$$

## 2.1.2 Bloque 2 Proceso

La función principal del bloque y de su función de transferencia es el de transformar la variable de caudal en presión, la cuál es la variable a manipular en este lazo de control.

Para el desarrollo de la función de transferencia y los bloques que representan el proceso se inició con el desarrollo de la ecuación matemática definida por Rentel (2009) que representa la tasa de cambio de presión para el gas en un separador bifásico:

$$P_{(t)}V_{g(t)} = Zn_{g(t)}RT \quad (1.19)$$

Dónde:

$P_{(t)}$  = Presión del separador en función del tiempo (psi)

$V_{g(t)}$  = Volumen del gas en función del tiempo (ft<sup>3</sup>)

$T$  = Temperatura del gas en la salida de la válvula (°R)

$Z$  = Factor de compresión del gas

$N_{g(t)}$  = Número de moles del gas en función del tiempo (Lb-mol)

$R$  = Constante universal de los gases (10,731 psi.ft<sup>3</sup>/lb-mol.°R)

Diferenciando y despejando la ecuación (1.19) en función de obtener una relación de salida (P) versus entrada ( $V_g$ ) se obtiene:

$$V_{g(t)} \frac{dP_{(t)}}{dt} = ZRT \frac{dn_{g(t)}}{dt} - P_{(t)} \frac{dV_{g(t)}}{dt} \quad (1.20)$$

El volumen del gas en un separador se puede expresar como la diferencia entre el volumen total en el separador y el volumen de líquido, por lo que el volumen del gas se puede expresar en función de la siguiente ecuación:

$$V_g = V_{separador} - V_l \quad (1.21)$$

Diferenciando

la ecuación (1.21) en función del tiempo y teniendo presente que el Volumen del separador es una variable constante y sustituyendo la derivada del volumen de líquido se tiene:

$$\frac{dV_g}{dt} = -(Q_{EL} - Q_{SL}) \quad (1.22)$$

El número de moles en función del tiempo representa la tasa de cambio en el volumen de gas según Rentel (2009), y su ecuación derivada se expresa:

$$\frac{dn_g}{dt} = (Q_{EG} - Q_{SG}) \frac{\rho_G}{M_G} \quad (1.23)$$

Dónde:

$Q_{EG}$  = Caudal de gas en la entrada del separador

$Q_{SG}$  = Caudal del gas en la salida del separador

$\rho_G$  = Densidad del gas (lb/ft<sup>3</sup>)

$M_G$  = Peso molecular del gas (lb/lb-mol)

Sustituyendo las ecuaciones de la tasa de cambio de volumen del gas (1.23) y la derivada del volumen del gas en función del tiempo (1.22) en la ecuación de la tasa de cambio de presión (1.20):

$$V_{g(t)} \frac{d P(t)}{dt} = \frac{ZRT\rho_G}{M_G} (Q_{EG} - Q_{SG}) + P(t)(Q_{EL} - Q_{SL}) \quad (1.24)$$

El volumen del gas en función del tiempo puede ser expresado en función de la ecuación linealizada del volumen del líquido (1.10), estableciendo la siguiente relación: Conociendo que el volumen del líquido ocupa una altura determinada de la altura total del separador, la diferencia entre estas alturas corresponde a la altura ocupada por el volumen del gas, esta relación se puede apreciar en forma visual en la Figura 9 y matemáticamente en la ecuación (1.25)

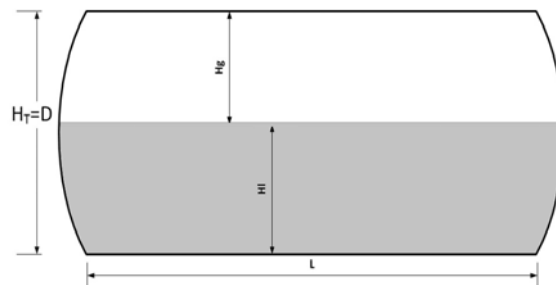


Figura 9. Forma del Separador Bifásico Horizontal

$$H_g = H_{separador} - H_l \quad (1.25)$$

Una vez determinada la ecuación se puede escribir la ecuación linealizada del volumen del líquido en función del volumen y altura del gas de la siguiente forma:

$$V_g = AH_g + B \quad (1.26)$$

$$V_g = A(H_{separador} - H_l) + B \quad (1.27)$$

Reescribiendo

la ecuación (1.27) en función del tiempo, considerando que la altura del separador es constante se tiene:

$$V_{g(t)} = A(H_{separador} - H_{l(t)}) + B \quad (1.28)$$

Sustituyendo la ecuación (1.28) en la ecuación (1.24) resulta:

$$\begin{aligned} & [A(H_{separador} - H_{l(t)}) + B] \frac{dP(t)}{dt} \\ & = \frac{ZRT\rho_G}{M_G} (Q_{EG} - Q_{SG}) \\ & + P(t)(Q_{EL} - Q_{SL}) \end{aligned} \quad (1.29)$$

La ecuación (1.29) es representativa del bloque del proceso, sin embargo se puede notar que esta ecuación presenta un comportamiento no lineal que impide realizar la transformada de Laplace, por lo que para su linealización se procede a cambiar todos los elementos no lineales que afectan el comportamiento final de la ecuación, por variables constantes que no dependen del tiempo. Estas variables son la altura del líquido y la función de la presión que varía en función del tiempo, las cuales serán sustituidas por sus valores set point.

Este análisis genera la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 [A(H_{separador} - H_{lSP}) + B] \frac{dP(t)}{dt} &= \frac{ZRT\rho_G}{M_G} (Q_{EG} - Q_{SG}) \\
 &+ P_{SP}(Q_{EL} - Q_{SL})
 \end{aligned} \tag{1.30}$$

Llevando esta ecuación a variables de desviación y a su transformada de Laplace:

$$\begin{aligned}
 [A(H_{separador} - H_{lSP}) + B] sP(s) &= \frac{ZRT\rho_G}{M_G} (Q_{EG(s)} - Q_{SG(s)}) + P_{SP}(Q_{EL(s)} - Q_{SL(s)})
 \end{aligned} \tag{1.31}$$

Por último se despeja en función de la presión para obtener la relación de la salida del bloque y se transforma en diagrama de bloques como se observa en la Figura 10.

De la 
$$P(s) = \frac{\frac{ZRT\rho_G}{M_G} (Q_{EG(s)} - \Delta Q_{SG(s)}) + P_{SP}(Q_{EL(s)} - Q_{SL(s)})}{[A(H_{separador} - H_{lSP}) + B]s} \tag{1.32}$$
 ecuación

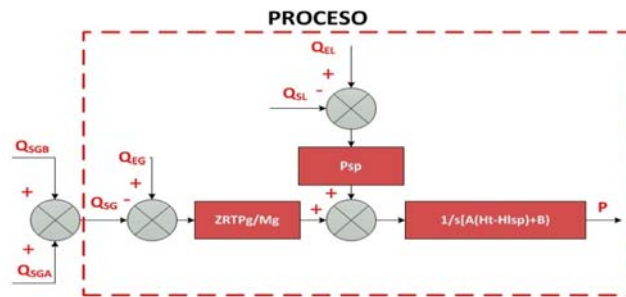


Figura 10. Diagramas de bloques interno del bloque del proceso del lazo de presión del separador bifásico horizontal

(1.32) se conoce los valores de Z igual a 0,99, R igual a 10,7317, Hseparador igual a 1,11 ft del documento: Mechanical Specification Sheet- Inlet Degasser el valor de  $\rho_G$  por el DFP del proceso, y HLsp 0,326ft y PSP 59,90 para la válvula A y 93,74 para la válvula B y Mg 19,4 del documento: Filosofía de Control, Operación y Protección del Proceso CPF, todos estos documentos fueron desarrollados por PDVSA Petrourica y SNC LAVALIN (2013)

2.1.3 Bloque 3 Transmisor de Presión PIT-1005

Tiene la misma función de transferencia del transmisor de nivel

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Luego de desarrollado el modelado matemático se implementaron los modelos en Matlab específicamente en la herramienta Simulink, a fin de entonar los controladores PID y obtener las respuesta de los mismos.

La entonación de PID fue ejecutada por medio de la herramienta Simulink exactamente en el área de PID Autotuning y las condiciones de requerimiento usadas para la selección de los controladores PID fueron de un tiempo de establecimiento de banda de 2%, un tiempo de subida con un criterio del (10 al 90)%, sobreimpulso menor al 10% y error de estado estable menor al 5%, todo esto basado en exigencias de las Normas PDVSA.

Los lazos de nivel y presión encargados del control del Separador Bifásico Horizontal fueron implementados y simulados simultáneamente debido a la dependencia que mantiene el lazo de presión con el lazo de nivel determinada en la ecuación La Figura 11 y Figura 12 muestran la implementación mencionada para el separador bifásico horizontal.

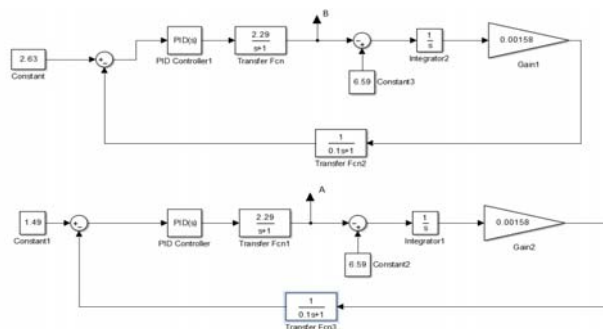


Figura 11. Lazos de Control de Nivel Implementado en Simulink

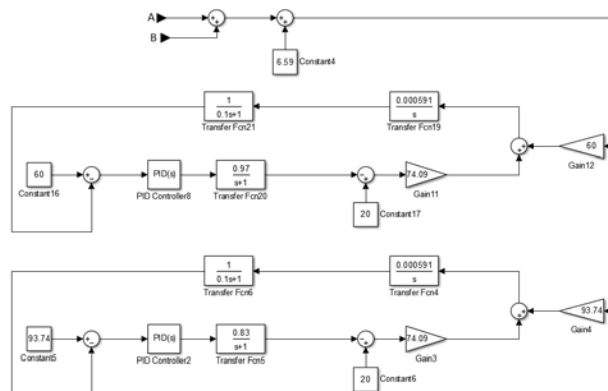




Figura 12. Lazos de Control de Presión Implementado en Simulink

**Lazos de Nivel de Emulsión**

La entonación de los controladores PID arrojó los siguientes parámetros para el controlador de cada válvula (LV-1002A/LV-1002B) . Una vez que se implementó en cada uno de los lazos de control descritos en los anteriores capítulos cada planta arrojó una respuesta que se puede observar en la Figura 13 y Figura 14.

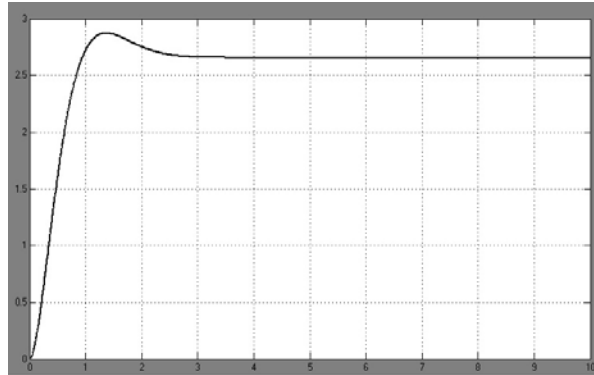


Figura 13. Respuesta de la planta de Nivel de la Válvula LV-1002A luego de la entonación del controlador PID del Separador Bifásico Horizontal

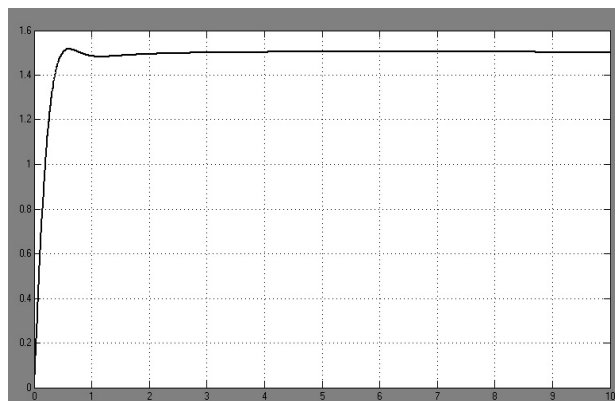


Figura 14. Respuesta de la planta de Nivel de la Válvula LV-1002B luego de la entonación del controlador PID del Separador Bifásico Horizontal

Las respuestas de cada uno de los sistemas otorgan los siguientes parámetros característicos para cada respuesta transitoria:

Tabla 1. Parámetros Característicos de la Respuesta del Sistema del Lazo de Control de Nivel para la Válvula LV-1002A del Separador Bifásico Horizontal

Parámetro	Valor
Máximo Sobreimpulso (Mp)	8,73

(%)	
Tiempo de Establecimiento (Ts) (s)	2,56
Tiempo de Subida (Tr) (s)	0,659
Estabilidad a Lazo Cerrado	Estable
Error de Estado Estable (%)	0,76

Tabla 2. Parámetros Característicos de la Respuesta del Sistema del Lazo de Control de Nivel para la Válvula LV-1002B del Separador Bifásico Horizontal

Parámetro	Valor
Máximo Sobreimpulso (Mp) (%)	0,651
Tiempo de Establecimiento (Ts) (s)	0,589
Tiempo de Subida (Tr) (s)	0,38
Estabilidad a Lazo Cerrado	Estable
Error de Estado Estable (%)	0,80

**Lazos de Nivel de Presión**

Debido a la dependencia con los lazos de nivel, los controladores de cada una de las válvulas de los lazos de presión fueron entonados una vez establecidos los parámetros de los controladores PID de nivel.

Luego de implementados los controladores con los parámetros anteriores se observó las respuestas del sistema observándose los parámetros característicos de su comportamiento de respuesta transitoria.

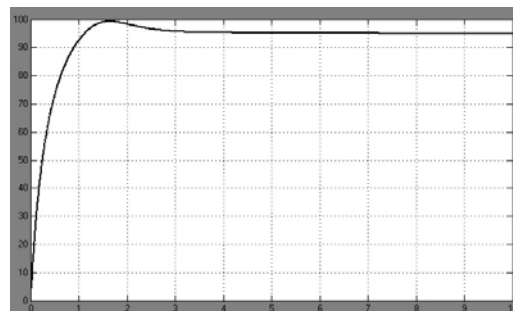


Figura 15. Respuesta de la planta de Presión de la Válvula PV-1005A luego de la entonación del controlador PID del Separador Bifásico Horizontal

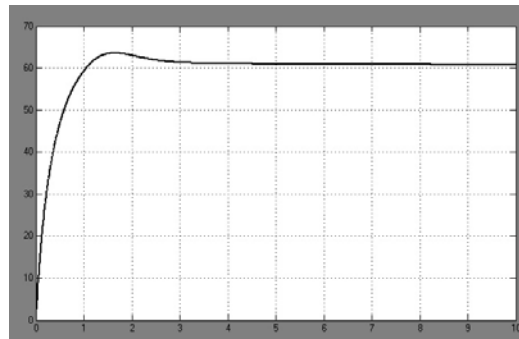


Figura 16. Respuesta de la planta de Presión para la válvula PV-1005B luego de la entonación del controlador PID del Separador Bifásico Horizontal

Tabla 3. Parámetros Característicos de la Respuesta del Sistema del Lazo de Control de Presión para la Válvula PV-1005A del Separador Bifásico Horizontal

Tabla 4. Parámetros Característicos de la

Parámetro	Valor
Máximo Sobreimpulso (Mp) (%)	10,2%
Tiempo de Establecimiento (Ts) (s)	1,01
Tiempo de Subida (Tr) (s)	0,256
Estabilidad a Lazo Cerrado	Estable
Error de Estado Estable (%)	1,33

Tabla 9. Respuesta del Sistema del Lazo de Control de Presión para la Válvula PV-1005B del Separador Bifásico Horizontal

Parámetro	Valor
Máximo Sobreimpulso (Mp) (%)	10,2%
Tiempo de Establecimiento (Ts) (s)	1,01
Tiempo de Subida (Tr) (s)	0,256
Estabilidad a Lazo Cerrado	Estable
Error de Estado Estable (%)	1,34

#### IV. CONCLUSIONES

El modelado matemático ejecutado para el equipo de separación bifásica y el tanque de compensación resultó bastante acertado para las exigencias de cada uno de los lazos que mantienen el control de emulsión en los equipos, logrando así el objetivo de desarrollar un modelado lineal del sistema.

A pesar de no contar físicamente con el equipo (separador bifásico), el modelado matemático desarrollado se considera que determina un comportamiento bastante aproximado al que la empresa desea para los equipos en un futuro.

La entonación de los controladores por medio de la herramienta PID Autotuning de Simulink permitió sin impedimentos la obtención de los parámetros de los controladores a pesar de la naturaleza de cada una de las plantas desarrolladas.

La respuesta de las plantas ante la implementación a lazo cerrado de los controladores PID obtenidos resultaron estables en el estado estacionario, mostrando en todos sus casos valores de sobreimpulso menores al 10%, errores de estado estacionario menores al 5% y tiempos de subida y establecimientos bastante rápidos. Todos estos valores demuestran que los controladores PID fueron correctamente ajustados en función de las exigencias de cada uno de los lazos de control de las plantas.

## V. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Corripio, A., & Smith, C. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control* (Vol. Segundo). Louisiana, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Rentel, G. (2009). Diseño de un Sistema de Control para un Medidor Multifásico para Prueba de Pozo. *Trabajo de Grado*. Ciudad Guayana: UNEXPO.
- Rosemount. (2011). *Comprehensive Product Catalog*. Chanhansen, USA: Emerson Process Management.
- Rodriguez, M., & Requena, J. (2006). Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos. *Trabajo de Grado*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.