



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN SEPARADOR  
CICLÓNICO CILÍNDRICO GAS-LÍQUIDO”**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

ING. PETROLERA Y GAS NATURAL - PRODUCCIÓN

P R E S E N T A:

**ING. DAVID ALBERTO ROJAS PÉREZ**

TUTOR:

**M. en I. NOEL SANTAMARÍA GUEVARA**



**2005**

---

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Fernando Samaniego Verduzco

Secretario: M. en I. José Àngel Gómez Cabrera

Vocal: M. en I. Noel Santamaría Guevara

1er. Suplente: M. en I. Francisco Sánchez Arredondo

2do. Suplente: M. en C. José Manuel Reyes

Lugar donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, México, D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

M. en I. Noel Santamaría Guevara

---

**FIRMA**

---

## **AGRADECIMIENTOS**

### **DOY GRACIAS A MIS PADRES:**

**Gonzalo Alberto Rojas García**

**María Eugenia Pérez de Rojas**

Por todo el amor, las enseñanzas y el apoyo que me brindaron para culminar mis estudios.

### **A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA UNAM:**

Por todas las enseñanzas impartidas y por el apoyo económico brindado a través de su plan de becas DGEP.

### **A MI DIRECTOR DE TESIS:**

**M. en I. Noel Santamaría Guevara**

Por toda la orientación brindada en la realización de este trabajo.

### **A MIS SINODALES:**

**Dr. Fernando Samaniego**

**M. en I. Francisco Sánchez Arredondo**

**M. en I. José Ángel Gómez Cabrera**

**M. en C. José Manuel Reyes**

Por todos sus valiosos comentarios y observaciones hechos a este trabajo.

---

**A MI HERMANA:**

**Eugenia Maria Rojas Pérez**

Porque siempre me brindo  
su apoyo en todo momento.

**A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS:**

**Rodolfo Lárez**

**Luis Enrique Granado**

**Maria Laura Lárez**

**José Luis González**

**Alejandro Sánchez**

**Guillermo Rivera**

Por su amistad y colaboración.

Y todos aquellos que no recuerdo y que me brindaron su apoyo en todo momento,  
gracias.

---

---

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS   | I  |
| LISTA DE TABLAS  | V  |
| RESUMEN  | VI |
| CAPÍTULO   |    |
| 1. INTRODUCCIÓN  | 1  |
| 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE SEPARADORES Y CONTROLADORES               | 5  |
| 2.1 SEPARADORES CONVENCIONALES                                       | 5  |
| 2.1.1 Separadores Bifásicos Horizontales                             | 6  |
| 2.1.2 Separadores Bifásicos Verticales                               | 7  |
| 2.2 SEPARADORES COMPACTOS  | 9  |
| 2.2.1 Separador Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido (CCGL)              | 13 |
| 2.2.2 Importancia de los Sistemas de Control en un Separador<br>CCGL | 14 |
| 2.3 PROCESOS DE CONTROL EN SEPARADORES BIFÁSICOS                     | 15 |
| 2.3.1 Control Proporcional (P)                                       | 15 |
| 2.3.2 Control Proporcional-Integral (PI)                             | 16 |
| 2.3.3 Control Proporcional-Derivativo (PD)                           | 17 |
| 2.4 TRANSMISORES   | 20 |
| 2.4.1 Transmisores Neumáticos  | 20 |

---

|  |    |
|--|----|
| 3. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE SEPARADORES<br>CICLÓNICOS CILÍNDRICOS GAS-LÍQUIDO | 22 |
| 4. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO  | 30 |
| 4.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA   | 30 |
| 4.2 MODELO MATEMÁTICO  | 33 |
| 4.2.1 Suposiciones del Modelo  | 33 |
| 4.2.2 Modelo Matemático para el Separador CCGL   | 35 |
| 4.2.3 Modelo Matemático para el Sistema de Control                                       | 39 |
| 4.3 APROXIMACIONES PARA RESOLVER EL SISTEMA DE<br>ECUACIONES                             | 49 |
| 4.3.1 Método Numérico para el Sistema no Lineal  | 50 |
| 4.3.2 Desarrollo de un Sistema Lineal  | 52 |
| 4.3.2.1 Modelo Lineal en Funciones de Transferencia                                      | 52 |
| 5. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO  | 67 |
| 5.1 DESCRIPCIÓN DEL SEPARADOR CCGL DE PRUEBA   | 68 |
| 5.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES   | 69 |
| 5.3 PREDICCIONES DEL MODELO  | 73 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES DE LAS SIMULACIONES DINÁMICAS                                | 82 |
| 6.1 CASO 1. (PROPORCIONAL---PROPORCIONAL)  | 86 |
| 6.2 CASO2. (PROPORCIONAL-INTEGRAL---PROPORCIONAL)  | 88 |
| 6.3 CASO 3. (PROPORCIONAL-DERIVATIVO---PROPORCIONAL)                                     | 90 |
| 6.4 CASO 4. (PROPORCIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVO ---<br>PROPORCIONAL)                   | 92 |
| 6.5 CASO 5. (PROPORCIONAL---PROPORCIONAL-INTEGRAL)                                       | 94 |

---

|  |     |
|--|-----|
| 6.6 CASO 6. (PROPORCIONAL---PROPORCIONAL-DERIVATIVO)   | 96  |
| 6.7 CASO 7. (PROPORCIONAL --- PROPORCIONAL - INTEGRAL -<br>DERIVATIVO)                         | 98  |
| 6.8 CASO 8. (PROPORCIONAL - INTEGRAL --- PROPORCIONAL -<br>DERIVATIVO)                         | 100 |
| 6.9 CASO 9. (PROPORCIONAL - DERIVATIVO --- PROPORCIONAL -<br>INTEGRAL)                         | 102 |
| 6.10 CASO 10. (PROPORCIONAL - INTEGRAL - DERIVATIVO ---<br>PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO)   | 104 |
| 6.10.1 Incremento de Gasto de Líquido  | 104 |
| 6.10.2 Incremento de Gasto de Gas  | 106 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES  | 108 |
| 7.1 CONCLUSIONES   | 108 |
| 7.2 RECOMENDACIONES  | 110 |
| NOMENCLATURA   | 113 |
| APÉNDICE A: Conceptos Fundamentales de Sistemas de Control                                     | 121 |
| APÉNDICE B: Desarrollo de las Ecuaciones Diferenciales de los<br>Diferentes Controladores      | 126 |
| APÉNDICE C: Desarrollo Matemático de las Funciones de<br>Transferencia de los Casos en Estudio | 133 |
| APÉNDICE D: Construcción del modelo Matemático en el Simulador<br>Matlab/Simulink              | 138 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 145 |

---

---

## LISTA DE FIGURAS

| Figura |  | Página |
|--------|--|--------|
| 2.1    | Separador Bifásico Horizontal.   | 7      |
| 2.2    | Separador Bifásico Vertical.   | 8      |
| 2.3    | Separador Compacto Tipo “Auger”.   | 10     |
| 2.4    | Separador Compacto Tipo “Split-Flo”.   | 11     |
| 2.5    | Separador Compacto Tipo “Gasunie”.   | 12     |
| 2.6    | Separador Compacto Tipo “Turbina Bifásica”.  | 12     |
| 2.7    | Separador Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido.  | 13     |
| 3.1    | Sistema de Medición-Separación con un CCGL en Minas, Indonesia.                          | 23     |
| 3.2    | Arrastre de Líquido bajo condiciones de Flujo Anular y Caótico.                          | 27     |
| 3.3    | Esquemático de la entrada inclinada en el separador CCGL y las velocidades tangenciales. | 28     |
| 3.4    | Sistema de Medición Multifásico con Medidores de una Sola Fase y Medidores Multifásicos. | 28     |
| 3.5    | Esquemático de configuración del Separador CCGL. Arrastre de Gas.                        | 29     |
| 4.1    | Esquemático del Sistema de Control de un Separador CCGL.                                 | 30     |
| 4.2    | Diagrama de Bloque Simple del Sistema de Control.  | 32     |
| 4.3    | Modelo General del Sistema de Control Dinámico del Separador CCGL.                       | 34     |
| 4.4    | Características de la Válvula de Control de Flujo.                                       | 47     |
| 4.5    | Diagrama de Bloque 1. Controlador de Nivel PD.   | 54     |
| 4.6    | Diagrama de Bloque 2. Línea de Transmisión Neumática.                                    | 55     |

---

| <b>Figura</b> |  | <b>Página</b> |
|---------------|--|---------------|
| 4.7           | Diagrama de Bloque3. Válvula de Control de Líquido.                | 56            |
| 4.8           | Diagrama de Bloque 4. Abertura de la Válvula de Líquido.           | 56            |
| 4.9           | Diagrama de Bloque 5.Relación Coeficiente de Flujo Líquido.        | 57            |
| 4.10          | Elemento Sumador 1 y Diagrama de Bloque 6.                         | 58            |
| 4.11          | Diagrama de Bloque 7. Relación Nivel de Líquido y volumen.         | 59            |
| 4.12          | Diagrama de Bloque 8. Ganancia del Transmisor de Nivel de Líquido. | 59            |
| 4.13          | Diagrama de Bloque 9. Controlador de Presión de Gas. PI.           | 60            |
| 4.14          | Diagrama de Bloque 10. Línea de Transmisión Neumática. PI.         | 61            |
| 4.15          | Diagrama de Bloque 11. Válvula de Control de Gas.                  | 61            |
| 4.16          | Diagrama de Bloque 12. Abertura de la Válvula de Gas.              | 61            |
| 4.17          | Diagrama de Bloque 13. Relación Coeficiente de Flujo Gas.          | 62            |
| 4.18          | Elemento Sumador 2 y Diagrama de Bloque 14.                        | 64            |
| 4.19          | Diagrama de Bloque 15. Relación entre el Flujo Neto y la Presión.  | 65            |
| 4.20          | Diagrama de Bloque 8. Ganancia del Transmisor de Nivel de Líquido. | 65            |
| 4.21          | Diagrama de Bloque General del Sistema de Control. Caso 9.         | 66            |
| 5.1           | Separador CCGL fabricado en la U. Tulsa. Sección de Prueba.        | 67            |
| 5.2           | Esquemático del CCGL fabricado en la U. Tulsa. Sección de Prueba.  | 68            |
| 5.3           | Resultados Prueba Experimental.                                    | 71            |

---

| <b>Figura</b> |   | <b>Página</b> |
|---------------|---|---------------|
| 5.4           | Simulador Construido en Matlab/Simulink. Validación del Modelo.                             | 76            |
| 5.5           | Gastos de Entrada y Salida de Líquido. Validación del Modelo.                               | 77            |
| 5.6           | Gastos de Entrada y Salida de Gas. Validación del Modelo                                    | 78            |
| 5.7           | Porcentaje de Abertura de la Válvula de Líquido. Validación del Modelo.                     | 79            |
| 5.8           | Porcentaje de Abertura de la Válvula de Gas. Validación del Modelo.                         | 79            |
| 5.9           | Nivel de Líquido. Validación del Modelo.  | 80            |
| 5.10          | Presión del Separador CCGL.   | 81            |
| 6.1           | Simulador Construido en Matlab/Simulink. Ejemplo Propuesto.                                 | 85            |
| 6.2           | Caso 1. (Proporcional---Proporcional). Incremento del Gasto de Líquido.                     | 87            |
| 6.3           | Caso 2. (Proporcional-Integral---Proporcional). Incremento del Gasto de Líquido.            | 89            |
| 6.4           | Caso 3. (Proporcional-Derivativo---Proporcional). Incremento del Gasto de Líquido.          | 91            |
| 6.5           | Caso 4. (Proporcional-Integral-Derivativo---Proporcional). Incremento del Gasto de Líquido. | 93            |
| 6.6           | Caso 5. (Proporcional---Proporcional-Integral). Incremento del Gasto de Gas.                | 95            |
| 6.7           | Caso 6. (Proporcional---Proporcional-Derivativo). Incremento del Gasto de Gas.              | 97            |
| 6.8           | Caso 7. (Proporcional---Proporcional-Integral-Derivativo). Incremento del Gasto de Gas.     | 99            |

---

| <b>Figura</b> |  | <b>Página</b> |
|---------------|--|---------------|
| 6.9           | Caso 8. (Proporcional-Integral---Proporcional-Derivativo).<br>Incremento del Gasto de Líquido.                       | 101           |
| 6.10          | Caso 9. (Proporcional-Derivativo---Proporcional-Integral).<br>Incremento del Gasto de Gas.                           | 103           |
| 6.11          | Caso 10. (Proporcional-Integral-Derivativo---Proporcional-<br>Integral-Derivativo). Incremento del Gasto de Líquido. | 105           |
| 6.12          | Caso 10. (Proporcional-Integral-Derivativo---Proporcional-<br>Integral-Derivativo). Incremento del Gasto de Gas.     | 107           |

---

## LISTA DE TABLAS

| <b>Tabla</b> |   | <b>Página</b> |
|--------------|---|---------------|
| 4.1          | Combinación de los Controladores de Gas y Líquido.        | 41            |
| 4.2          | Sistema de Ecuaciones Diferenciales. Caso 9.              | 50            |
| 5.1          | Datos Generales del Experimento.                          | 70            |
| 5.2          | Características de los Controladores usados en la Prueba. | 71            |
| 5.3          | Datos de entrada al Simulador. Validación del Modelo.     | 74            |
| 5.4          | Cálculos de las Ganancias. Validación del Modelo.         | 75            |
| 5.5          | Ganancias de los Controladores. Validación del Modelo.    | 75            |
| 6.1          | Datos de entrada al Simulador. Ejemplo Propuesto.         | 83            |
| 6.2          | Cálculos de las Ganancias. Ejemplo Propuesto.             | 84            |
| 6.3          | Ganancias de los Controladores. Ejemplo Propuesto.        | 84            |

---

## RESUMEN

Las aplicaciones de campo de los separadores Ciclónicos Cilíndricos Gas-Líquido (CCGL), dependen fuertemente de la implementación de una buena estrategia de control, esto es debido a que son equipos muy compactos que poseen tiempos pequeños de residencia que aumentan la posibilidad de arrastre de una fase en otra. En este trabajo, se derivó un modelo dinámico para controlar el nivel de líquido y la presión en un separador CCGL, basado en las ecuaciones de balance de masa de gas y líquido en el recipiente. El modelo incorpora teoría de sistemas de control lineal y puede usarse para simular el funcionamiento de cualquier tipo de controlador comercial (Proporcional, Integral, Derivativo o una combinación de estos) y cualquier tipo de condiciones de flujo de entrada. Se desarrolló un simulador usando el software Matlab/Simulink para resolver el sistema de ecuaciones planteadas. El modelo fue parcialmente validado usando datos experimentales, tomados de trabajos desarrollados en la Universidad de Tulsa. Los resultados indicaron que asumiendo datos razonables de entrada para los controladores y las características de las válvulas, el modelo provee predicciones muy acertadas para tanto el nivel de líquido como la presión del separador.

En este estudio se determinó, que no es conveniente incorporar un controlador proporcional para el nivel de líquido o presión de gas cuando se espera que el separador trabaje bajo condiciones de bacheo severo. Por otra parte, se verificó que la mejor estrategia de control obtenida para simular tanto el arribo de un bache de líquido como el arribo de un incremento de gas al separador es la incorporación de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo, tanto para el nivel de líquido como para la presión del gas, ya que se asegura que las dos variables controladas retornen a su punto de ajuste y el tiempo de estabilización de ambos lazos sea el más rápido posible.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Un separador es un recipiente usado para separar gas, aceite y agua de una mezcla multifásica producida de pozos petroleros. Debido a su función es de vital importancia para la operación y buen desempeño de las instalaciones de producción de un campo. Todos los separadores deben de realizar las funciones siguientes:

- ✓ Llevar a cabo la separación de la primera etapa la cual es predominantemente separar los hidrocarburos líquidos de los gaseosos.
- ✓ Estabilizar en fase líquida la mayor cantidad de moléculas de hidrocarburos livianos.
- ✓ Remover las burbujas de gas que entran en la fase líquida proveyendo suficiente área transversal y tiempo de retención.

La industria petrolera ha venido usando equipos para este propósito de gran peso y tamaño y muy costosos para adquirir y operar. En años recientes, la industria ha mostrado interés en el desarrollo y la aplicación de alternativas innovadoras para disminuir el tamaño, peso y costo de los equipos de separación, debido principalmente a las restricciones que se tienen en locaciones remotas o costa afuera. Una de estas alternativas es el separador ciclónico cilíndrico gas-líquido (CCGL). El dispositivo cilíndrico ciclónico es un separador simple, compacto, de bajo costo y peso que requiere mínimo mantenimiento y es muy fácil de instalar y operar, por lo que esta ganando mucha popularidad como una alternativa económica y atractiva para diferentes aplicaciones de campo.

Un problema importante del uso de esta tecnología de separadores ciclónicos es el arrastre de líquido en la corriente de gas y el arrastre de gas en la corriente de

---

líquido. Este arrastre de líquido puede ocurrir en la línea de salida del gas en forma de gotas o de flujo estratificado y el arrastre de gas puede ocurrir mediante la entrada de burbujas de gas en la corriente de salida del líquido. De esta manera el funcionamiento de un separador ciclónico cilíndrico puede ser considerablemente mejorado mediante una buena estrategia de control, la cual pueda eliminar los problemas de arrastres de corrientes líquidas y gaseosas en las líneas de descarga de cada fase. Por otra parte, pueden ocurrir casos en donde los pozos petroleros produzcan los fluidos del yacimiento en forma de baches de grandes volúmenes, lo cual trae como consecuencia que el separador en algunos casos se inunde y permita que la corriente de líquido se dirija hacia el tope del separador, ocasionando una salida de flujo gas-líquido por la línea de descarga del gas, también este problema puede ser manejado mediante un adecuado sistema de control.

Estudios previos realizados principalmente en la Universidad de Tulsa también han demostrado que el comportamiento de un separador compacto puede ser mejorado considerablemente mediante la incorporación de sistemas de control adecuados. En donde uno de los estudios más importantes y reconocidos fue realizado por Wang<sup>14</sup>, el cual desarrolló un modelo dinámico para el control de un separador ciclónico cilíndrico gas-líquido. Sin embargo, en su estudio no considero en su totalidad todas las posibles combinaciones de controladores comerciales, por lo cual, uno de los objetivos principales de este estudio o aportes para la expansión del estado del arte de los sistemas de control en separadores compactos es llevar a cabo simulaciones dinámicas utilizando diferentes estrategias de control con diferentes escenarios de producción que permitan diagnosticar que tipo de controlador (Proporcional, Integral, Derivativo o una combinación de estos) puedan instalarse en los separadores compactos para eficientar su proceso. Por tal motivo, se pretende organizar y representar estos sistemas de control con el uso de las ecuaciones fundamentales de los controladores y mediante un balance de transferencia de masa en el separador.

---

De igual manera la Universidad de Tulsa (Gómez y Mohan<sup>3</sup>) desarrolló un simulador comercial para el diseño de separadores compactos, basado principalmente en un modelo mecánico para describir el comportamiento del flujo en el separador (Gómez y colaboradores<sup>4</sup>). Este simulador ha sido usado para diseñar más de 100 unidades CCGL que operan actualmente en los Estados Unidos y en el mundo. Una de las aplicaciones más atractivas ha sido la utilización de este equipo en un sistema de lazo de medición, en donde tanto la corriente de gas y líquido separadas por el equipo compacto son medidas con medidores de flujo y luego son recombinadas. De igual manera, en algunos casos no se utilizan sistemas de control en aplicaciones de separadores compactos, por lo cual en este estudio se pretende identificar, con el análisis de los resultados obtenidos, cuando sería conveniente instalar un sistema de control de acuerdo a su aplicación en campo.

De esta manera, el principal objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo matemático que permita representar lo más exacto y veraz posible como puede funcionar un determinado sistema de control en un separador ciclónico gas-líquido, con diferentes escenarios de flujo y diferentes tipos de controladores. Para la formulación del modelo se tomaron en cuenta los siguientes parámetros fundamentales:

- ✓ Volumen del Separador.
- ✓ Gastos de líquido y gas a manejar.
- ✓ Tipos de controladores a instalar en el separador.
- ✓ Presión de ajuste del separador.
- ✓ Temperatura de operación.
- ✓ Propiedades del fluido (densidad, viscosidad, factor de compresibilidad del gas).
- ✓ Nivel de ajuste de líquido en el separador.

---

En resumen los objetivos de este trabajo son:

- ✓ Desarrollar un modelo matemático que permita conocer las diferentes respuestas de los sistemas de control instalados en el separador con diferentes situaciones de flujo.
- ✓ Construir un Simulador que represente las ecuaciones planteadas del modelo matemático mediante la ayuda del software comercial Matlab a través de su módulo para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales en bloques de transferencias llamado Simulink.
- ✓ Validar el modelo matemático mediante datos experimentales.
- ✓ Llevar a cabo simulaciones dinámicas que permitan evaluar las diferentes estrategias de control y que permitan identificar cuando es recomendable instalar un determinado sistema de control de acuerdo a la aplicación que se tenga en campo.

La tesis está estructurada en 7 capítulos, los cuales son: El capítulo 1 el cuál presenta las generalidades, el planteamiento del problema y los objetivos a desarrollar. En el capítulo 2 se describen en forma detallada las bases teóricas de los diferentes equipos de separación así como la descripción de todos los tipos de controladores industriales que se pueden instalar en un sistema de control. El capítulo 3 está dirigido a presentar el estado del arte de la tecnología de separación gas-líquido mediante el uso de separadores compactos ciclónicos cilíndricos. El capítulo 4 muestra el desarrollo del modelo matemático y su resolución mediante un sistema lineal. La validación de los resultados, con datos experimentales es presentada en el capítulo 5. El análisis y discusión de los resultados son desarrollados en el capítulo 6 y finalmente las conclusiones y recomendaciones son mostradas en el capítulo 7.

---

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE SEPARADORES Y CONTROLADORES**

La separación del aceite y gas es muy importante debido a que uno de los objetivos primordiales de la explotación de crudo es tratar de mantener la mayor cantidad posible de hidrocarburos livianos en fase líquida, ya que de esta manera se obtienen mayores beneficios económicos por su venta.

A continuación se presenta una breve descripción tanto de los separadores convencionales como de los compactos, los cuales se han diferenciado de los convencionales por su bajo peso, tamaño y en algunos casos por los dispositivos internos que los conforman. Esta tecnología se ha hecho muy atractiva para baterías de producción en plataformas costa afuera en donde los espacios son muy reducidos y hay limitantes en peso.

### **2.1 SEPARADORES CONVENCIONALES**

La separación convencional consiste principalmente de dos o tres etapas de separación. Estos separadores son generalmente recipientes de formas cilíndricas que pueden tener orientación horizontal o vertical. Un recipiente convencional de separación normalmente es el equipo inicial de proceso de cualquier instalación de producción y un diseño inapropiado de este componente puede reducir la capacidad de proceso de toda la instalación. Los separadores son clasificados de dos fases si son capaces de separar el gas de la corriente líquida y de tres fases si también son capaces de separar la corriente líquida en aceite y agua.

Existen dos factores principales que determinan el tamaño de los separadores convencionales. El primer factor es el tiempo de retención del líquido. Un tiempo

---

considerable y un espacio de almacenamiento de líquido es requerido para asegurar que el líquido y el gas alcancen el equilibrio a la presión de separación. El segundo factor que afecta el tamaño del recipiente es la velocidad de asentamiento de las gotas de líquido contenidas en el gas. El propósito de la sección de asentamiento por gravedad del recipiente es acondicionar al gas para la separación final en el extractor de niebla. Las gotas de líquido se asentarán a la velocidad determinada mediante la igualación de la fuerza de gravedad sobre las gotas y la fuerza de arrastre causada por el movimiento relativo a la fase continua de gas.

### **2.1.1 SEPARADORES BIFÁSICOS HORIZONTALES**

El fluido entra al separador (Fig. 2.1) y golpea el desviador de entrada causando un cambio importante en el momentum del flujo y se empieza a producir la separación gruesa del líquido y vapor. Después de un suficiente intervalo de tiempo, la fuerza de gravedad causa que las gotas de líquido caigan al fondo del recipiente en donde es recolectado en la fase líquida. Esta sección de recolección de líquido provee un tiempo necesario de retención requerido para permitir que el gas entrante salga del aceite y se eleve a la sección de vapor. También provee un volumen si se requiere manejar baches intermitentes de flujo. Después el líquido deja el recipiente a través de su válvula de descarga, la cual esta regulada mediante un controlador de nivel de líquido. El controlador registra cambios en el nivel de líquido y controla la válvula de descarga apropiadamente.

El gas fluye sobre el desviador de entrada y horizontalmente a través de la sección de asentamiento de gravedad arriba del líquido. A medida que el gas fluye a través de esta sección, pequeñas gotas de líquido que no fueron separadas por el desviador de entrada son separadas por gravedad y caen en la interfase gas-líquido. Algunas gotas son de un diámetro tan pequeño que no son muy fácilmente separadas en la sección de asentamiento por gravedad. Por lo

tanto, antes de que el gas salga del recipiente pasa a través de un extractor de niebla. Esta sección emplea venas o platos que tienen la capacidad de remover las pequeñas gotas. La presión en el separador es mantenida mediante un controlador de presión, el cual registra la presión en el separador y envía una señal para abrir o cerrar la válvula de control de presión. Mediante el control del gasto de gas de salida del separador, la presión en el separador es mantenida constante a la presión deseada. Normalmente los separadores horizontales son operados con el nivel de líquido lleno hasta la mitad del separador para maximizar el área de la interfase gas-líquido<sup>1</sup>.

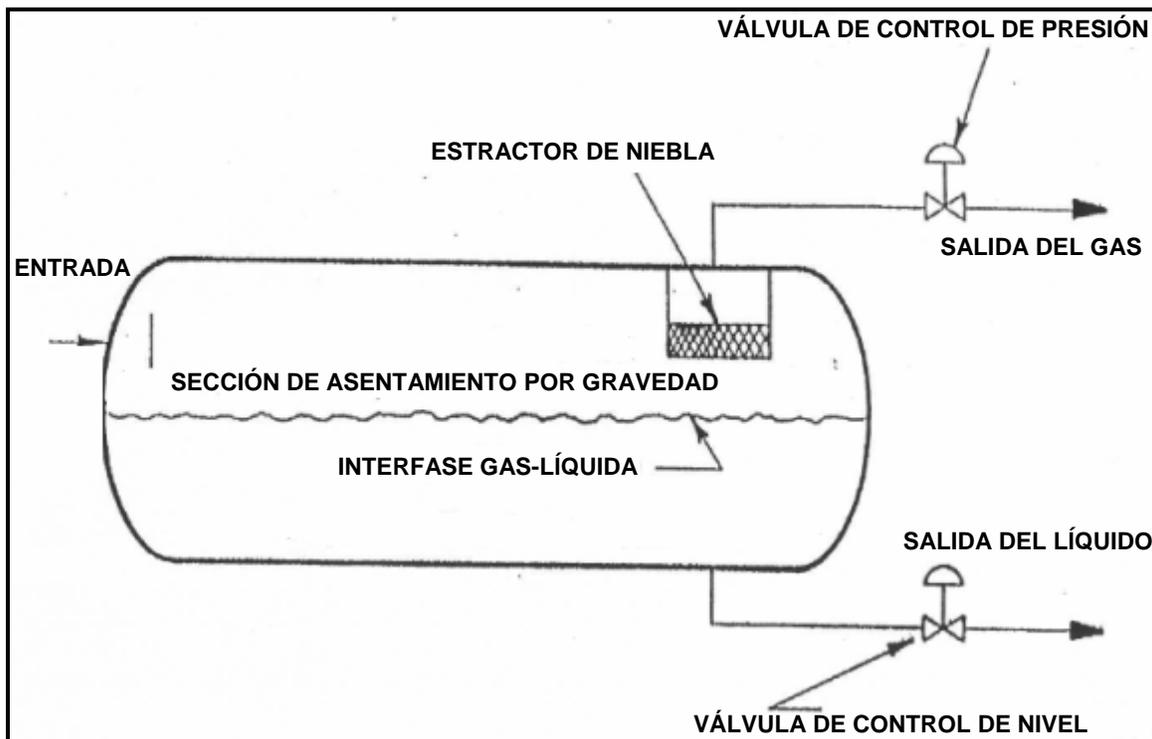
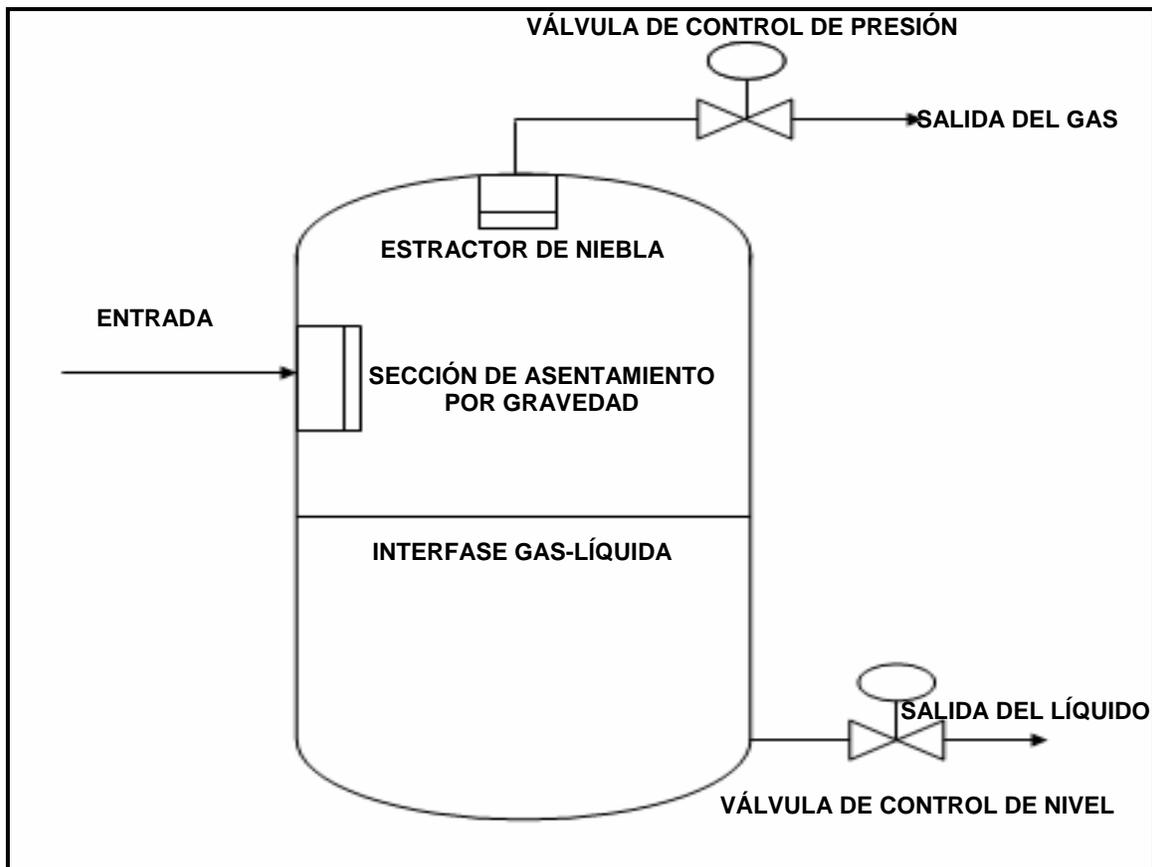


Fig. 2.1 Separador Bifásico Horizontal

### 2.1.2 SEPARADORES BISAFICOS VERTICALES

La figura 2.2 presenta un esquemático de este tipo de separador. Como en el separador horizontal, el desviador de entrada realiza la separación gruesa inicial

de la fase líquida y gaseosa. El líquido fluye hacia abajo donde se encuentra la sección de recolección de líquido y luego sigue bajando hacia la línea de descarga. A medida que el líquido alcanza un equilibrio, las burbujas de gas fluyen en contra de la dirección del flujo de líquido y eventualmente migran al espacio de vapor. El controlador de nivel y la válvula de descarga de líquido operan de la misma manera que en un separador horizontal. El gas fluye sobre el divertidor de entrada y después hacia la salida de gas. En la sección de asentamiento por gravedad, las gotas de líquido caen hacia abajo, en contra del flujo de gas. El gas va hacia la sección del extractor de niebla antes de abandonar el recipiente. La presión y el nivel son mantenidos como en un separador horizontal<sup>1</sup>.



**Fig. 2.2 Separador Bifásico Vertical**

---

## 2.2 SEPARADORES COMPACTOS

El comportamiento de los separadores compactos tienen la misma función que los convencionales, pero ellos lo hacen en un espacio mucho más pequeño. Esto es debido al uso de fuerzas centrífugas y patrones de flujo resultantes para separar las fases inmiscibles de diferentes densidades. La separación convencional de dos líquidos o de líquido y gas dependen de la fuerza de gravedad. Debido a que las dos fases tienen diferentes densidades, la fuerza de gravedad causa que la sustancia con mayor densidad caiga al fondo del separador mientras que la más ligera se eleva. Si la afectación por la fuerza de gravedad es de alguna manera incrementada localmente por una acción centrífuga, entonces la separación ocurre más rápidamente.

Los separadores compactos pueden ser diseñados para que la fuerza centrífuga sea mil veces más grande que la fuerza de gravedad. Mediante el incremento de la velocidad de separación, la necesidad de tiempos largos de retención en el recipiente son eliminados y también el tamaño del recipiente puede ser reducido. Técnicas de separación que utilizan fuerzas centrífugas pueden no producir corrientes de salidas con buena calidad como los separadores convencionales, pero pueden servir para propósitos prácticos. Los principales tres tipos de servicio de separación que proporcionan los separadores compactos son separación de volumen de gas y líquido, tanques de separación de aceite-agua y agua tratada.

Un problema asociado con este tipo de separación es que los equipos tienden a ser más sensibles a variaciones de flujo que los separadores convencionales. El control de líquido y los niveles de la interfase son difíciles de manejar en condiciones de bacheo. Por lo tanto hay un potencial de cargar líquido por arriba de las burbujas de gas en los separadores gas-líquido y una pequeña calidad de aceite y agua en los separadores agua-aceite. De esta manera, los separadores

---

compactos pueden ser usados en aplicaciones donde la calidad de salida no sea crítica o donde la calidad de una sola de las corrientes separadas sea importante. Los separadores compactos pueden ser mucho más sensibles a taponamiento con parafinas, productos corrosivos, arenas, erosión y fallas mecánicas<sup>2</sup>.

Varios tipos de separadores compactos están disponibles para ser usados en la separación gas-líquido. Ellos son el “Auger”, Separador “Slipt-Flo”, la Turbina Bifásica y el más utilizado y conocido el Separador Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido. El separador tipo “Auger” (Fig. 2.3) es un separador gas-líquido compacto simple que puede ser usado tanto para procesos de fondo o de superficie. El fluido multifásico entra axialmente en la base de la unidad y es forzado a rotar debido a venas estacionarias helicoidales que hay en el recipiente. El líquido fluye a la pared de salida debido a la diferencia de densidades de fase. Una fracción del gas pasa a través de un puerto localizado en la pared interna y es removido mientras que el remanente de gas y líquido continúa y sale axialmente al tope de la unidad.

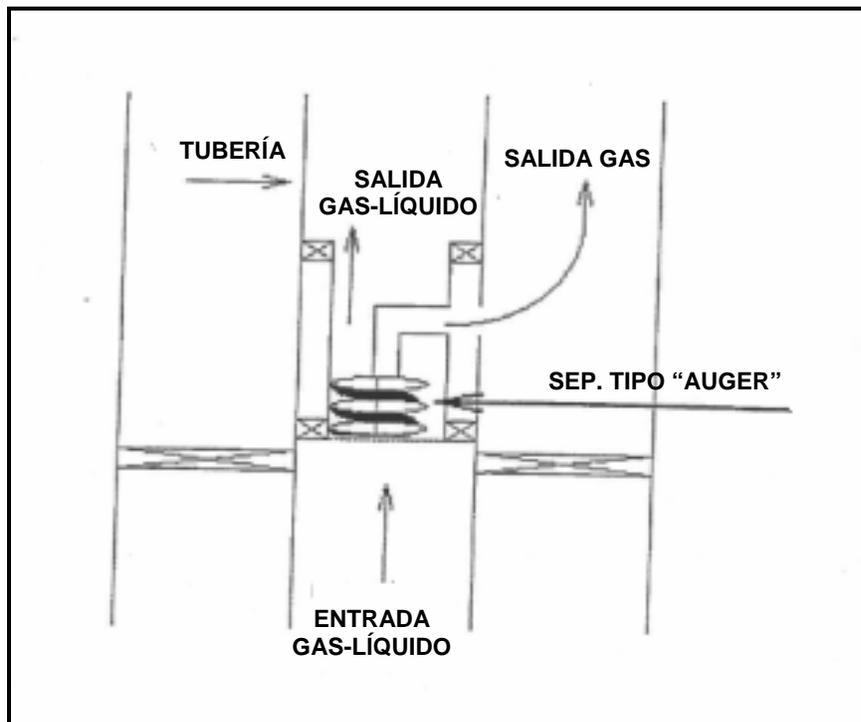
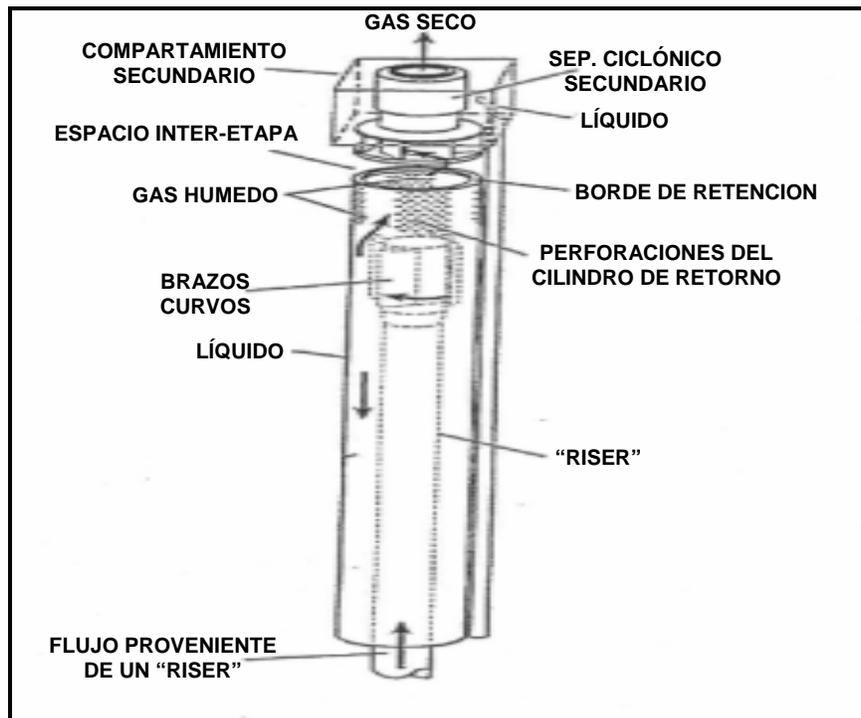


Fig. 2.3 Separador Compacto Tipo “Auger”

---

El separador “Split-Flo” (Fig. 2.4) consiste de un separador primario y secundario. Ambos utilizan las fuerzas centrífugas en la separación del gas del líquido. Los fluidos pasan sobre superficies curvas entre el separador primario para producir la fuerza centrífuga. El separador primario típicamente remueve el 99% del líquido entrante en el gas. La segunda etapa de separación remueve las gotas de líquido remanente para producir un gas con alta calidad.



**Fig. 2.4 Separador Compacto Tipo “Split-Flo”**

El separador “Gasunie” (Fig 2.5) también usa fuerzas centrífugas para separar las partículas pesadas del gas. El gas converge hacia adentro de un “Vortex” invertido y sale en el tope del recipiente. El líquido es contenido en la pared externa y corre hacia abajo para salir por el fondo de la cámara.

La Turbina Bifásica (Fig. 2.6) realiza la separación combinando la separación gas-aceite con la energía recuperada. La turbina usa una boquilla de dos fases para convertir la energía de presión y térmica del líquido y la mezcla de vapor a

energía cinética. La velocidad resultante de la mezcla de dos fases afecta en el cilindro rotatorio para producir la fuerza centrífuga la cual separa la mezcla<sup>2</sup>.

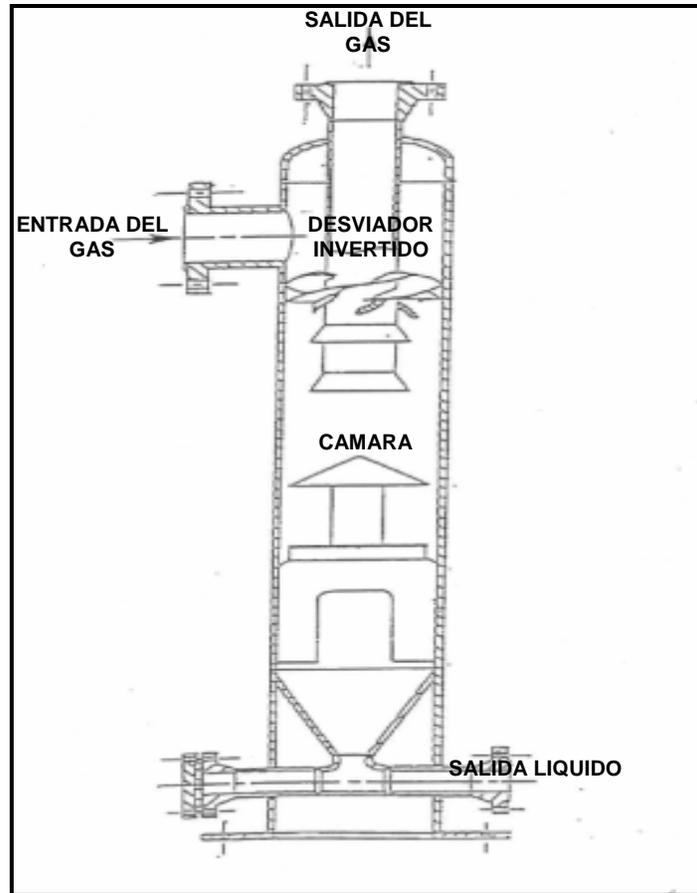


Fig. 2.5 Separador Compacto Tipo "Gasunie"

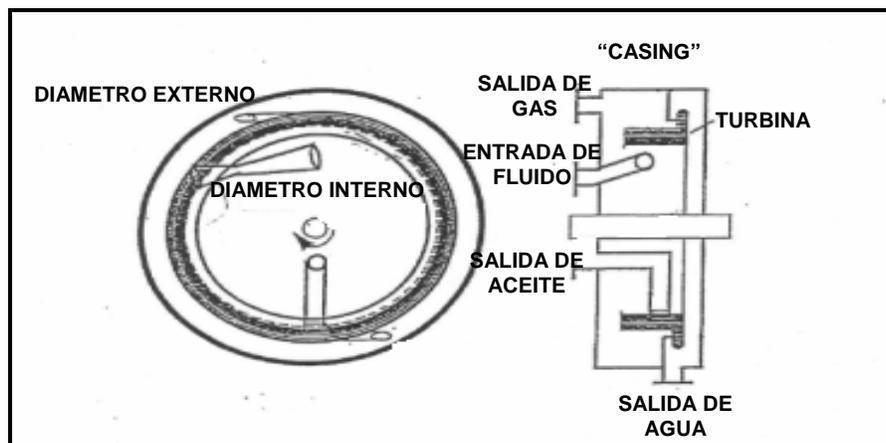


Fig. 2.6 Separador Compacto Tipo "Turbina Bifásica"

## 2.2.1 SEPARADOR CICLÓNICO CILÍNDRICO GAS-LÍQUIDO

En la figura 2.7 se muestra un separador ciclónico cilíndrico gas-líquido. Un separador ciclónico cilíndrico es una tubería instalada verticalmente con entradas tangenciales inclinadas descendentes, con salidas en el tope y en la parte del fondo de la tubería. No tiene partes móviles ni equipos internos. Debido a la entrada tangencial, el flujo forma un movimiento tipo remolino produciendo fuerzas centrífugas. Las dos fases de la mezcla de entrada son separadas mediante fuerzas centrífugas y de gravedad. El líquido es forzado radialmente hacia las paredes del cilindro y es recolectado en el fondo, mientras que el gas se mueve hacia el centro del ciclón y va saliendo por la salida del tope<sup>3</sup>.

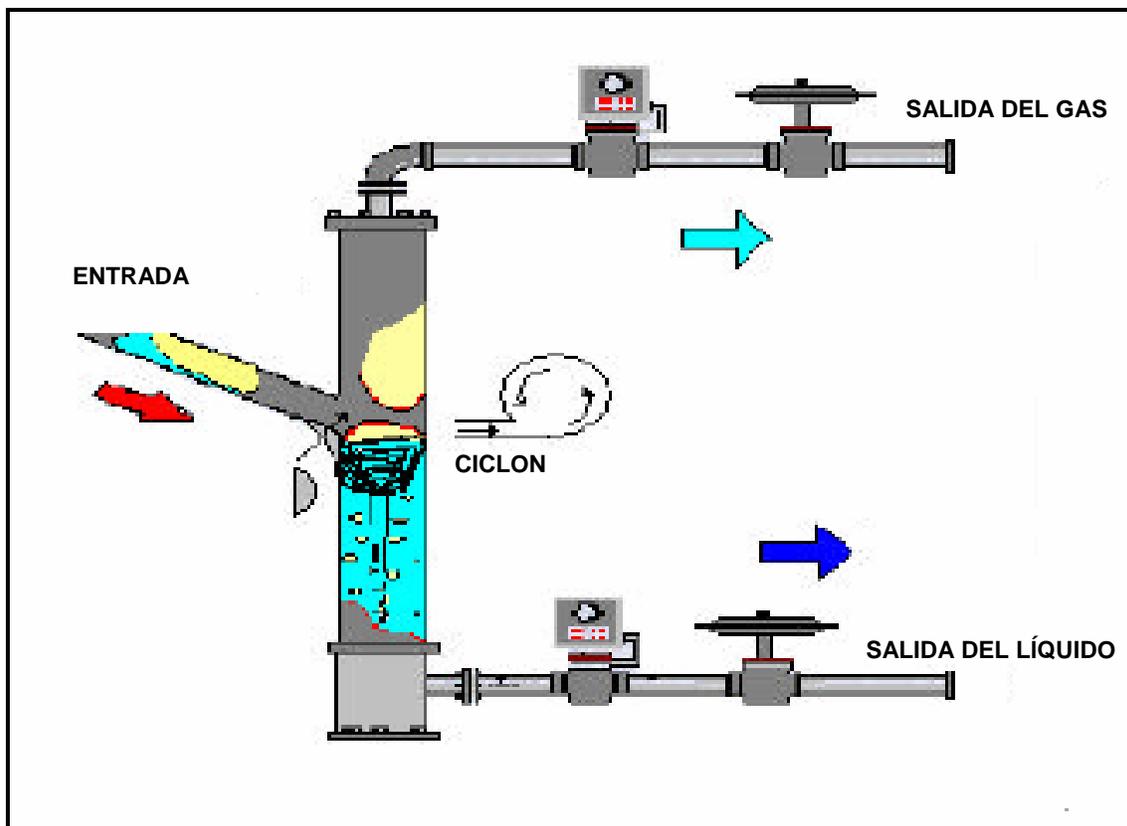


Fig. 2.7 Separador Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido

---

El separador CCGL además de poder utilizarse en una batería de separación convencional, también tiene potencial de uso para sistemas de medición de pruebas de pozo, control de relación gas-líquido en medidores multifásicos, recipiente sin partes internas empleado para separar líquidos o sólidos del gas en sistemas de venteo de gas o medidores de gas húmedo, equipos externos de pre-separación de corriente en baterías de separación convencional y separación primaria o separación submarina. El CCGL es también considerado para utilizarse en procesos de separación de fondo.

Una falta de entendimiento de la compleja hidrodinámica del flujo multifásico que ocurre adentro de un CCGL no permite un buen diseño para todas las necesidades de la industria petrolera. El conocimiento de la hidrodinámica del comportamiento de flujo puede permitir que los usuarios de los separadores CCGL puedan realizar apropiados diseños para todas las configuraciones y aplicaciones antes descritas<sup>4</sup>.

### **2.2.2 IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL EN UN SEPARADOR CCGL**

La operación de un separador CCGL esta limitado por dos fenómenos físicos: uno es el arrastre de líquido en la corriente gas y el otro es el arrastre de gas en la corriente de líquido. El arrastre de líquido puede ocurrir en la tubería de salida de gas como flujo estratificado o gotas de líquido. Si se pudiera tener una buena predicción de estos dos fenómenos se tendría un buen diseño del separador, lo cual evitaría estos problemas. De esta manera, al no tener en la actualidad la forma de predecir eficazmente estos fenómenos es imprescindible el tener una buena estrategia de control en el separador, para poder así controlar el nivel de líquido y evitar en lo posible el arrastre de líquido en la corriente de gas, lo cual es lo que ocurre frecuentemente cuando entra en el separador un volumen grande de líquido en forma de bache<sup>5</sup>. A continuación se presenta una breve

---

descripción teórica de los diferentes procesos de control que pueden ser instalados en separadores bifásicos.

## **2.3 PROCESOS DE CONTROL EN SEPARADORES BIFÁSICOS**

Generalmente un regulador de contrapresión en la línea de salida del gas controla la presión del separador. La temperatura en el separador usualmente no es controlada, excepto por unidades especiales de baja temperatura. Separadores de dos fases tienen un controlador de nivel de líquido para la sección de acumulación de líquido que activa una válvula de descarga para mantener el nivel de líquido deseado. Un separador requiere un sistema de control de retroalimentación en orden para mantener el control tanto de la fase líquida como la gaseosa. Existen tres tipos básicos de controladores: Proporcional (P), Derivativo (D) e Integral (I). Hay muchas combinaciones posibles para crear controladores híbridos: Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID). El propósito del controlador integral es eliminar la compensación que ocurre en el controlador proporcional cuando el sistema no está operando en el punto de ajuste de diseño. El controlador derivativo puede mejorar el tiempo de respuesta del sistema, mediante la anticipación del futuro y tomando acciones rápidas<sup>6</sup>. A continuación se presenta una breve descripción de los tipos de controladores. En el apéndice A se hace una revisión más detallada de todos los conceptos fundamentales que se aplican en un sistema de control.

### **2.3.1 CONTROL PROPORCIONAL (P)**

En un control proporcional existe una relación lineal entre la señal de salida del controlador  $m(t)$  y su entrada al error  $E(t)$

$$m(t) = K_p E(t) + m_o \quad (2.1)$$

---

Donde  $K_p$  es la constante de proporcionalidad,  $m_o$  es la salida del controlador cuando  $E(t) = 0$  ó posición del elemento final de control para  $E(t) = 0$ . Cuando el sistema opera estacionariamente alrededor de un punto de operación, se puede escribir la ecuación (2.1) como:

$$m = K_p E + m_o \quad (2.1')$$

Si restamos (2.1) – (2.1'), se obtiene el comportamiento del controlador expresado en variables de perturbación:

$$(m(t) - m) = K_p (E(t) - E) \quad (2.2)$$

$$m^*(t) = K_p E^*(t) \quad (2.2')$$

Aplicando la Transformada de Laplace a (2.2') se tiene:

$$M^*(s) = K_p E^*(s) \quad (2.3)$$

Por lo tanto la función transferencia es:

$$G_c(s) = \frac{M^*(s)}{E^*(s)} = K_p = K_c \quad (2.4)$$

Una característica importante del control proporcional es que produce un error de la variable dinámica en el punto de operación, cuando ocurre un cambio. Puede ser minimizado por un gran valor de  $K_c$  o un pequeño valor de la banda proporcional, lo cual es un cambio porcentual en la variable de salida que produce un movimiento completo de la válvula o elemento final de control<sup>6</sup>.

### 2.3.2 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

Al agregar la acción integral a la proporcional se elimina el “offset” o desviación estable. Industrialmente se usa el (PI) y no el (I) puro. Este tipo de control puede

---

ser empleado en sistemas que tienen grandes cambios, pero estos a su vez, deben ser lentos para evitar sobre impulsos producidos por el tiempo de integración. Una desventaja es que durante el arranque de los procesos de bacheo, la acción integral causa considerables impulsos de error antes de alcanzar el punto de operación. La expresión matemática que define a este tipo de controlador es:

$$m(t) = K_p E(t) + \frac{K_p}{T_i} \int E(t) + m_o \quad (2.5)$$

Y la función de transferencia correspondiente es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.6)$$

Donde  $T_i$  es el tiempo integral, cuya función es regular la acción integral. Su recíproco recibe el nombre de frecuencia de reposición y mide las veces que por unidad de tiempo se repite la acción “proporcional”. Esta clase de controlador incrementa el tiempo de un sistema. En general su efecto se traduce en disminuir apreciablemente el error en estado estacionario a costa de una desmejora de la parte transitoria de la respuesta del sistema controlado.

### 2.3.3 CONTROL PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)

Este control no elimina el “offset” producido por el control proporcional, sin embargo puede colocarse en sistemas con cambios rápidos mientras que el “offset” sea aceptable. Su representación matemática viene dada por la siguiente expresión:

$$m(t) = K_p E(t) + K_p T_D \frac{dE(t)}{dt} + m_o \quad (2.7)$$

---

Y la correspondiente función de transferencia por:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad (2.8)$$

Como se puede apreciar en (2.8), este tipo de controlador introduce un cero en la función de transferencia de lazo abierto. Esta acción derivativa tiene como ventaja anticiparse al error.

### 2.3.4 CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID)

Este tipo de controlador reúne las ventajas de todos los controladores. Las ecuaciones que lo representan están a continuación:

$$m(t) = K_p E(t) + \frac{K_p}{T_i} \int E(t) dt + K_p T_d \frac{dE(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Y su correspondiente transformada de Laplace es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.10)$$

Este tipo de control puede usarse en cualquier proceso bajo cualquier condición de control:

- ✓ La acción proporcional corrige la salida del controlador en una cantidad proporcional a la desviación.
- ✓ La acción integral corrige la salida del controlador en una cantidad proporcional a la integración de la desviación.
- ✓ La acción derivativa corrige a la salida del controlador en una cantidad proporcional a la tasa de cambio de error.

- 
- ✓ El efecto de este control es que tiene la capacidad de adelantar la respuesta, mejorar la estabilidad y no modifica el estado estacionario.

De una manera resumida se pueden enunciar los diferentes efectos que presentan los tipos de controladores descritos anteriormente:

- ✓ **Acción Proporcional (P)**

1. Acelera la respuesta de los procesos controlados.
2. Produce "offset" para todos los procesos de tipo cero.

- ✓ **Acción Integral (PI)**

1. Elimina el "offset".
2. La eliminación del "offset" se produce a expensas de mayores desviaciones.
3. Se producen respuestas con grandes oscilaciones.
4. Si se aumenta la ganancia del controlador  $K_c$  para aumentar la velocidad de respuesta del sistema, este se comporta más oscilatorio, teniendo riesgos de alcanzar inestabilidad.

- ✓ **Acción Derivativa (PD)**

1. Anticipa futuros errores e introduce acciones para contrarrestarlos.
2. Introduce efectos estabilizadores en la respuesta a lazo cerrado<sup>7</sup>.

---

## **2.4 TRANSMISORES**

Son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas. Las más empleadas en la industria son las tres primeras, las señales hidráulicas se utilizan ocasionalmente cuando se necesita una gran potencia y las señales telemétricas se emplean cuando hay una distancia de varios kilómetros entre el transmisor y el receptor. Los transmisores neumáticos generan una señal de 3 a 15 psig. Los transmisores electrónicos generan la señal estándar de 4-20 mA, a distancias de 200 mts a 1 Km, según sea el tipo de instrumento transmisor y también pueden generar una señal digital. Los transmisores se pueden clasificar en neumáticos y electrónicos (electrónico convencional, electrónico inteligente con señal analógica y electrónico inteligente con señal digital). A continuación se presenta una descripción de los transmisores neumáticos, los cuales son los más utilizados en los sistemas de control de separadores.

### **2.4.1 TRANSMISORES NEUMÁTICOS**

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática. El sistema es alimentado por una presión, la cual es la que se desea medir, de esta forma y por medio del elemento de medición, la presión sensada es transformada en una señal neumática proporcional que indica su valor.

El sistema tobera-obturador consiste en un tubo neumático alimentado a una presión constante, con una reducción en su salida en forma de tobera, la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador cuya posición depende

---

del elemento de medida. Existen varios tipos de transmisores neumáticos, entre ellos tenemos los siguientes:

- ✓ Transmisor con bloque amplificador de dos etapas.
- ✓ Transmisor de equilibrio de movimientos.
- ✓ Transmisor de equilibrio de fuerzas.
- ✓ Transmisor de equilibrio de momentos.

El más utilizado para la transmisión de presión y temperatura es el transmisor de equilibrio de movimientos, el cual compara el movimiento del elemento de medición asociado al obturador con un fuelle de retroalimentación de la presión posterior de la tobera. El conjunto se estabiliza según la diferencia de movimientos alcanzando siempre una posición de equilibrio tal que existe una correspondencia lineal entre la variable y la señal de salida.

**Características:**

- ✓ La señal es de 3-15 psig.
- ✓ Tienen una precisión de  $\pm 1\%$ .

**Ventajas:**

- ✓ La comunicación se realiza de una manera rápida.
- ✓ El montaje del transmisor es sencillo.

**Desventajas:**

- ✓ Para su funcionamiento necesita aire limpio.
- ✓ No guarda información.
- ✓ Distancias limitadas.
- ✓ Necesita de un mantenimiento constante.
- ✓ Es muy sensible a vibraciones.

---

### **3. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE SEPARADORES CICLÓNICOS CILÍNDRICOS GAS-LÍQUIDO**

El mejor método para diseñar un separador ciclónico cilíndrico gas-líquido es mediante el uso de datos de campo. Cuando estos datos no están disponibles, el ingeniero de diseño debe recurrir a la experiencia adquirida durante largos años de trabajo o recurrir a basarse en un equipo piloto de laboratorio que ayude a representar lo más veraz posible las condiciones de operación en campo. Independientemente de la geometría del separador (Vertical, Horizontal, Esférico) o tipo (dos fases o tres fases), un separador de aceite y gas debe ser dimensionado de tal manera que nunca opere arriba del gasto máximo de diseño. El dimensionamiento de un separador debe estar basado en el gasto máximo instantáneo esperado, en lugar del promedio del gasto de producción diario, esto se debe a que se puede tener un flujo tipo bache en el sistema de producción.

En el presente, más de 350 unidades de separadores CCGL han sido instalados y puestos en marcha en campos petroleros para varias aplicaciones. El tamaño de estos equipos varía desde 3 pies hasta 5 pies de diámetro y de 7 a 20 pies de altura. La figura 3.1 muestra el separador CCGL más largo que hay instalado en el mundo, es una unidad de 5 pies de diámetro y 20 pies de alto la cual se encuentra en operación en Minas, Indonesia, en una configuración de un lazo de medición-separación. Este separador sigue siendo aún llamado compacto debido a que si se utilizará un separador convencional para manejar ese volumen sus dimensiones serían mucho mayores que el CCGL.

Un separador CCGL en una configuración de un lazo de medición, en donde la salida del gas y líquido son recombinadas, es capaz de auto regularse el nivel de líquido para pequeñas variaciones de flujo. Sin embargo, para grandes

---

variaciones de flujo, es esencial tener un apropiado sistema de control para buenas operaciones. También, separadores CCGL para otras aplicaciones, como separación de volúmenes, deben tener sistemas de control adecuados de tal manera de prevenir el sobre flujo de líquido a través de salida de la corriente de gas y el arrastre de gas en la corriente de líquido. Hay una necesidad de desarrollar estrategias apropiadas de control, herramientas de diseño y simuladores para controles de separadores CCGL debido a su corto tiempo de residencia en la vasija y las grandes aplicaciones que este tipo de separador compacto posee.



**Fig. 3.1 Sistema de medición-separación con un CCGL en Minas, Indonesia.**

Schmidth y colaboradores<sup>8</sup> desarrollaron un modelo hidrodinámico en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias, basados en principios físicos fundamentales. El modelo fue usado para calcular la longitud del flujo tapón, la longitud de la burbuja, la velocidad frontal del tapón y el colgamiento de líquido

---

en el bache y el colgamiento de líquido en la burbuja. Mediante esta investigación se pudieron realizar estudios posteriores de comportamiento de separadores con flujo bache.

Genceli<sup>9</sup> desarrolló un modelo dinámico para el comportamiento de un receptor de baches. El separador es asumido para operar bajo condiciones severas de bacheo al final de una tubería con flujo de dos fases. Tanto el nivel de líquido como la presión fueron controladas por controladores Proporcionales-Integrales y ninguna otra opción de control fue considerada. La respuesta del sistema de este receptor de baches fue muy lenta, debido al largo tiempo de residencia asociado con este gran recipiente horizontal.

Arpandi y colaboradores<sup>10</sup> y Marti y colaboradores<sup>11</sup> han conducido una revisión detallada de la literatura de la tecnología de separación compacta ciclónica cilíndrica gas-líquido, las cuales revelan que hay muy poca información acerca del diseño óptimo y comportamiento de un separador CCGL. La mayoría de las investigaciones están basadas en correlaciones experimentales. Los modelos existentes para separadores ciclónicos han sido limitados a un flujo de una sola fase con una baja concentración de la fase dispersa. También, no hay modelos confiables disponibles (Motta y colaboradores<sup>12</sup>) para ciclones (cónicos o cilíndricos) que sean capaces de simular un flujo Multifásico separado en un ciclón.

Muchas investigaciones (Kolpak<sup>13</sup>, Wang<sup>14</sup>, Mohan y colaboradores<sup>15</sup> y Gomez<sup>16</sup>) han demostrado que el comportamiento de un separador compacto puede ser mejorado mediante la incorporación de sistemas de control amigables. Kolpak<sup>13</sup> desarrolló un modelo hidrostático para control pasivo de separadores compactos en un lazo de medición. Este modelo predice la sensibilidad del nivel de líquido con respecto al gasto de entrada del líquido y gas. Para separadores de flujo bifásico gas-líquido que operan bajo condiciones

---

de flujo bache, la dinámica del sistema es muy crucial, especialmente cuando se añade un sistema de control al separador.

Los autores (Wang<sup>14</sup> y Mohan<sup>15</sup>) desarrollaron un modelo en estado estacionario para un sistema de control de un separador CCGL y presentaron un análisis de sensibilidad a diferentes condiciones de flujo. Investigaciones experimentales detalladas en un desarrollo nuevo de un sistema de control pasivo para un separador CCGL demostró que el sistema de control pasivo mejoró considerablemente la operación del CCGL en diferentes condiciones de flujo.

Wang<sup>14</sup> desarrolló un modelo dinámico para el control de un separador ciclónico cilíndrico gas-líquido. El nivel de líquido y presión fueron controlados usando estrategias clásicas de control. El modelo probó ser significativamente importante para el comportamiento del separador CCGL operando en condiciones de bacheo. Los controladores que fueron encontrados ser los más amigables para controlar el nivel de líquido y la presión fueron el Proporcional-Derivativo (PD) y el Proporcional Integral (PI), por lo menos desde el punto de vista de estabilidad operacional. El diseño del controlador fue basado en la geometría del separador CCGL. Un diagrama de controlador de dos bloques fue usado, uno para el control de nivel de líquido y el otro para el control de presión en el CCGL.

Roy y Smith<sup>17</sup> discutieron los algoritmos de control en controladores digitales para conocer el nivel de control promedio para un sistema de un tanque recolector de una sola fase. Estos algoritmos de control son un objetivo importante en procesos químicos, donde la salida de humo desde el tanque es muy importante.

Galichet y colaboradores<sup>18</sup> presentaron el desarrollo de un controlador lógico que mantiene un nivel flotante en un tanque (una sola fase) en el tope de una unidad atmosférica de destilación de una refinería.

---

Wang y colaboradores<sup>19, 20</sup> condujeron investigaciones mediante experimentos detallados en separadores CCGL acerca del arrastre de líquido en la corriente de gas mediante el uso de controladores para varios gastos de flujo. Ellos también han desarrollado diferentes estrategias de control y simuladores de sistemas de control para aplicaciones de campo de separadores compactos.

Chirinos y colaboradores<sup>5</sup> estudiaron el fenómeno del arrastre de líquido en separadores compactos ciclónicos cilíndricos gas-líquido mediante análisis teóricos y experimentales. Datos experimentales fueron recolectados incluyendo la curva operacional del arrastre de líquido y el porcentaje del arrastre de líquido debajo de la curva operacional. Los datos mostraron que a bajos gastos de gas y altos gastos de líquido bajo condiciones de flujo caótico en la parte superior del separador CCGL, grandes cantidades de líquido pueden ser arrastrados fácilmente (Fig. 3.2). Por otra parte, a altos gastos de gas y bajos gastos de líquido, bajo condiciones de flujo anular, se puede exceder la curva operacional de tal manera de disminuir el arrastre de líquido.

También Chirinos y colaboradores<sup>5</sup> desarrollaron un modelo mecanístico para la predicción del porcentaje de arrastre de líquido por debajo de la curva operacional para condiciones de flujo caótico. Un modelo existente para la predicción de arrastre de líquido fue extendido para condiciones de alta presión, mostrando buenos resultados.

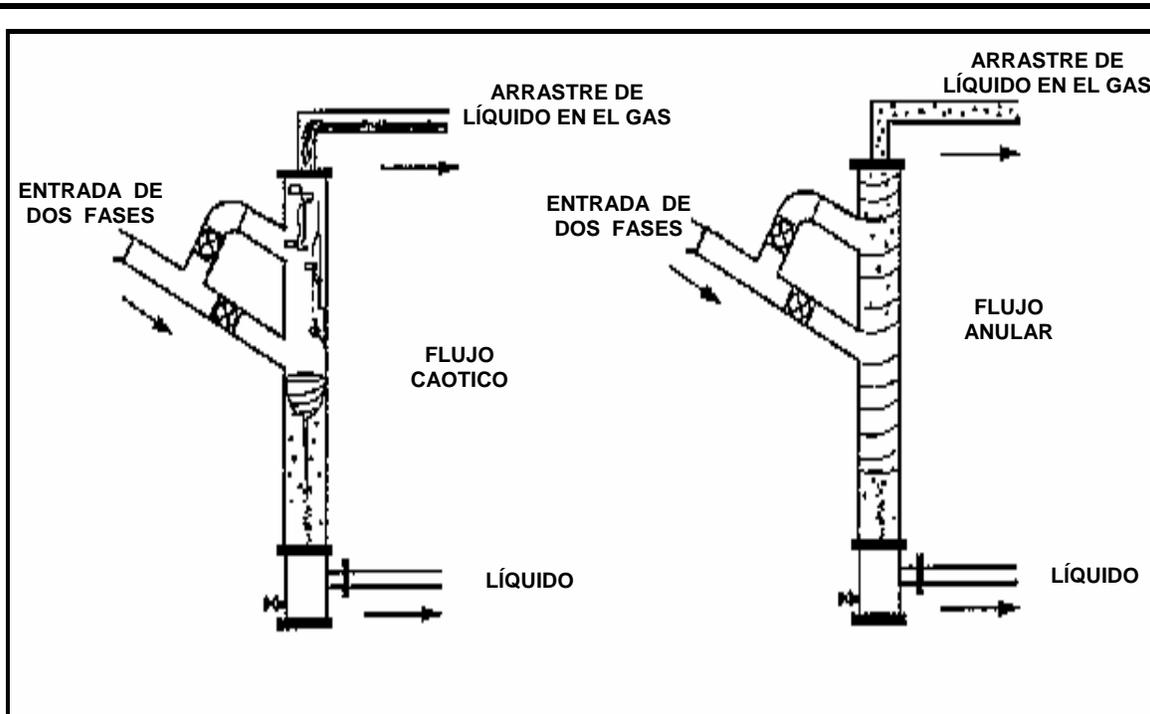
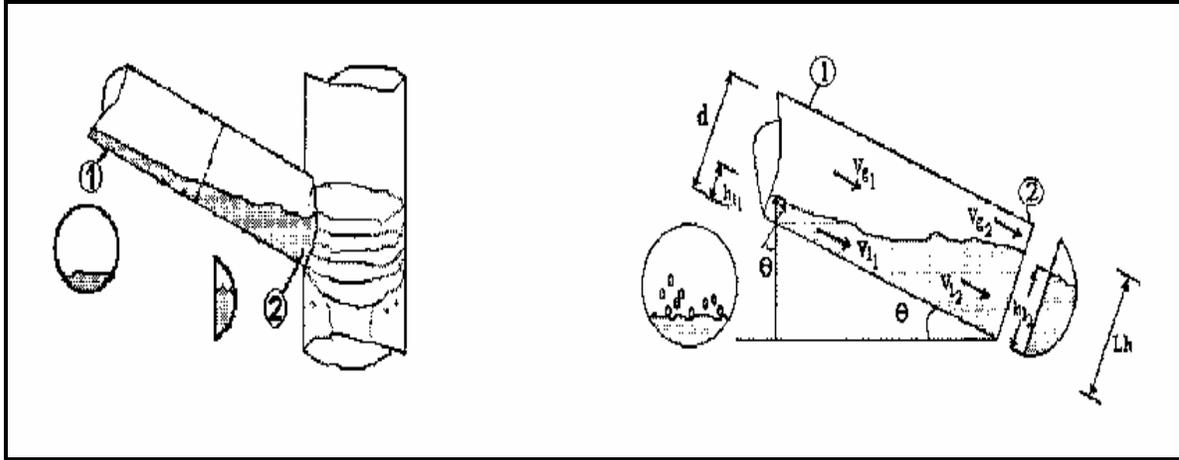
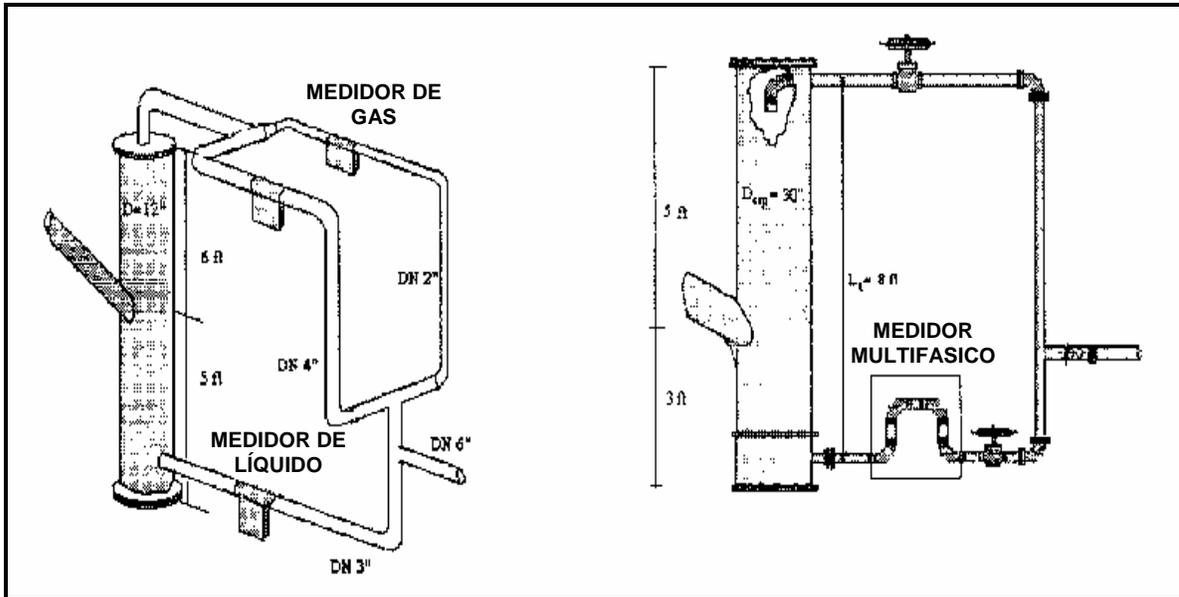


Fig. 3.2 Arrastre de Líquido bajo condiciones de Flujo Anular y Caótico.

Gómez y colaboradores<sup>4</sup> mejoraron un modelo existente para la predicción del comportamiento hidrodinámico de flujo inclinado de entrada en un separador CCGL. La principal mejora incorporada al modelo fue el análisis de la dependencia de un patrón de flujo en la entrada del separador ciclónico cilíndrico para predecir las velocidades tangenciales del gas y líquido (Fig. 3.3). Cuatro separadores típicos instalados en campo fueron diseñados a partir de este modelo matemático. Esto incluyó un sistema de medición Multifásico tanto con medidores de flujo monofásico y multifásico y pre-separación (Fig. 3.4). Las aplicaciones de campo demostraron la capacidad del separador CCGL y su impacto positivo en la industria petrolera. Pero igualmente los autores comentan que debido a una falta de entendimiento del complejo fenómeno de comportamiento del flujo multifásico dentro del separador CCGL, no permite que esta tecnología tenga un crecimiento grande que pueda desplazar por completo el uso de los separadores convencionales.



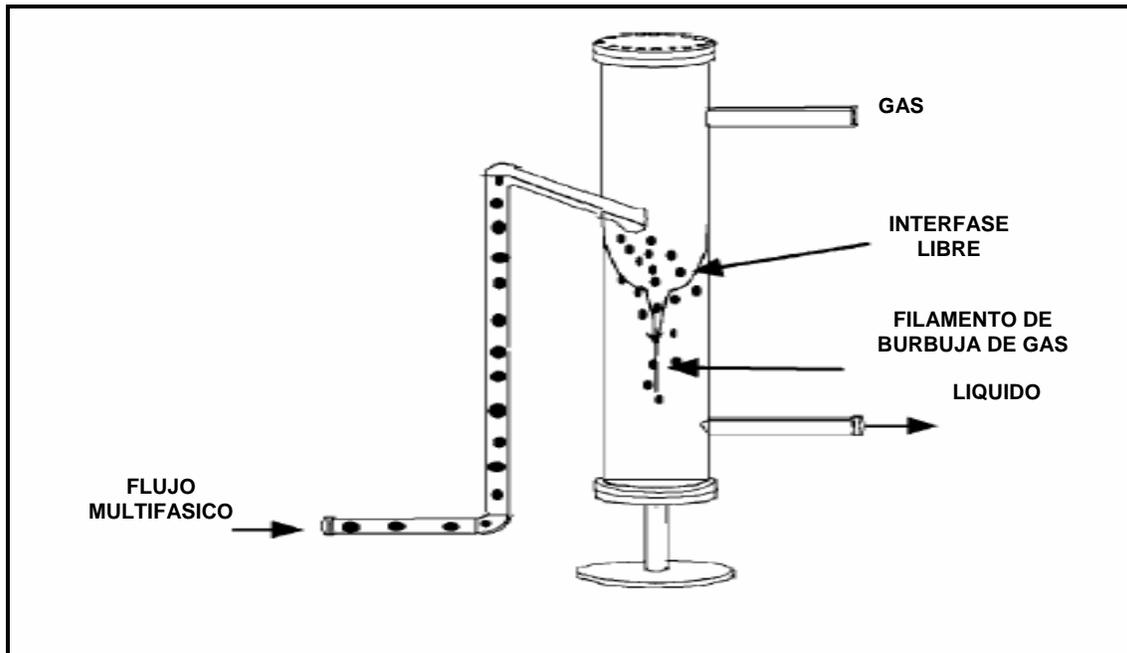
**Fig. 3.3 Esquemático de la entrada inclinada en el separador CCGL y las velocidades tangenciales.**



**Fig. 3.4 Sistema de Medición Multifásico con Medidores de una Sola Fase y Medidores Multifásicos.**

Erdal y colaboradores<sup>21</sup> investigaron el comportamiento de pequeñas burbujas de gas en la parte inferior del separador CCGL y el fenómeno del arrastre de gas en la corriente de líquido (Fig. 3.5). Esta investigación fue llevada a cabo

mediante una visualización de flujo y a través del uso de un código comercial disponible de dinámica de fluidos computacionales. Simulaciones de una fase y dos fases fueron llevadas a cabo y la trayectoria de las burbujas fue obtenida en una simetría axial-simétrica que representó la configuración típica de un separador CCGL. El análisis de la trayectoria de la burbuja fue usada para cuantificar los efectos de los parámetros importantes en el arrastre de burbujas. Estos incluyeron el tamaño de la burbuja, viscosidad, número de Reynolds, velocidad de entrada tangencial, entre otros. De esta manera se tienen varios trabajos desarrollados para modelar el flujo en un separador CCGL y para diseños de sistemas de control. En el próximo capítulo se presenta un modelo matemático desarrollado basado en los trabajos descritos anteriormente, con el objetivo de añadir nuevas consideraciones y simular varias estrategias de control que permita expandir el estado del arte de la separación mediante esta nueva tecnología.



**Fig. 3.5 Esquemático de configuración del separador CCGL. Arrastre de Gas.**

## 4. DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO

El modelo matemático consiste de dos partes, la primera parte es el modelo para el separador CCGL y la segunda es el modelo para el sistema de control. El modelo CCGL es desarrollado basado en las ecuaciones de balance de masa de gas y líquido y el comportamiento de flujo de las respectivas fases en el separador.

### 4.1 DEFINICION DEL SISTEMA

Un esquemático del sistema de control de un separador CCGL es mostrado en la figura 4.1. El separador tiene una entrada de flujo de dos fases y salidas de una fase de gas y otra de líquido.

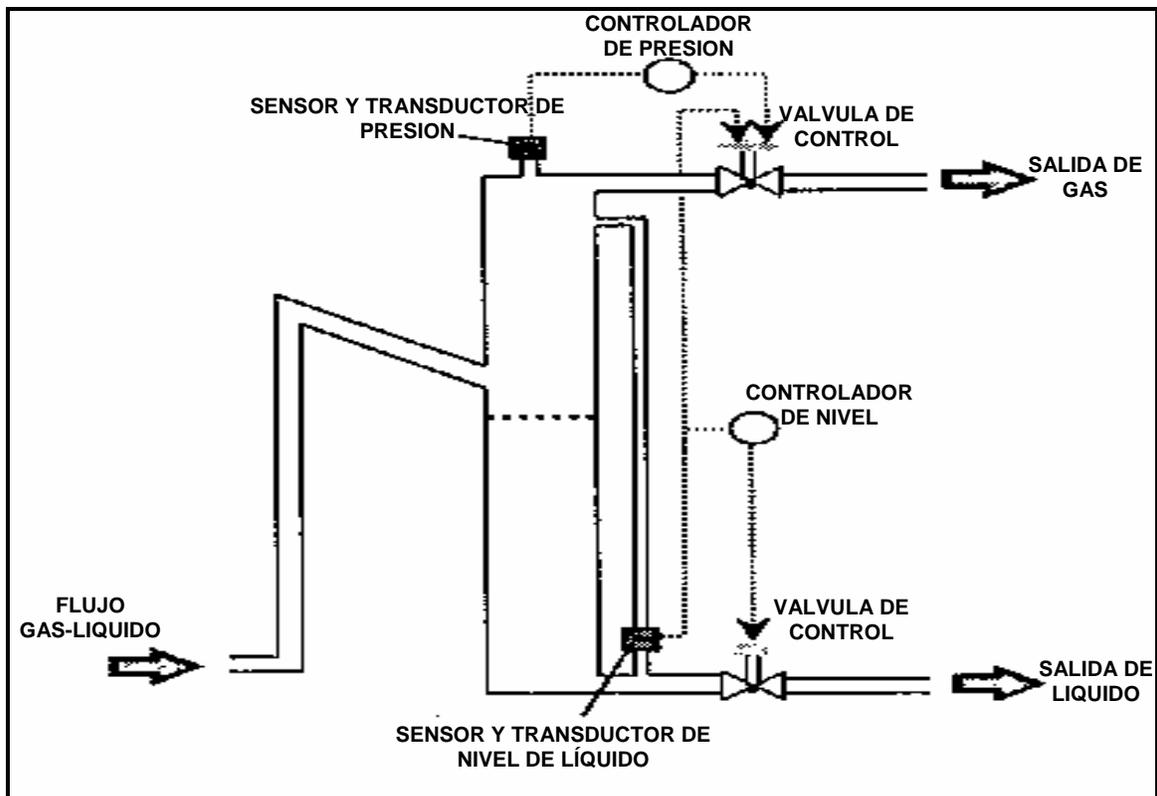


Fig. 4.1 Esquemático del Sistema de Control de un Separador CCGL.

---

Un transductor y sensor de presión mide la presión del gas y un sensor de nivel, el cual se comporta como un transductor de presión diferencial, es usado para determinar el nivel dinámico en el separador CCGL. La señal del sensor de nivel es enviada hacia el controlador de nivel de líquido el cual controla la abertura de la válvula de descarga de líquido, para condiciones normales de flujo. Sin embargo, para condiciones de grandes cantidades de flujo de líquido, el nivel de líquido se puede elevar hacia el tope del separador aún cuando la válvula de control de líquido esté completamente abierta. Durante esta circunstancia, el arrastre de líquido en la corriente de gas puede ser evitado mediante el cierre de la válvula de gas ocasionando una contrapresión en el separador CCGL. Las máximas descargas de gastos de líquido y gas pueden ser determinadas mediante la capacidad de descarga de cada tubería de líquido y gas acorde con las siguientes ecuaciones<sup>22</sup>:

$$Q_{Lsalida\_max} = 0.022228 \times C_{vL} \left( \frac{P_{CCGL} - P_L}{\gamma_L} \right)^{0.5} \quad (4.1)$$

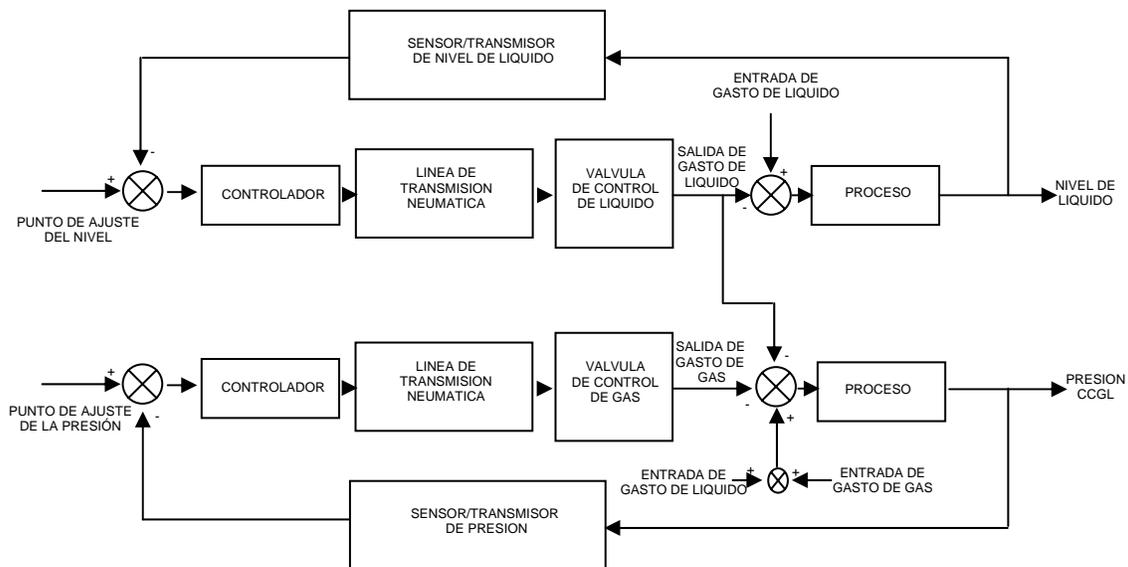
$$Q_{Gsalida\_max} = C_{vG} N_7 F_P P_{CCGL\_Ajuste} Y \sqrt{\frac{x}{\gamma_G T Z}} \quad (4.2)$$

Donde,  $P_L$  y  $P_{CCGL}$  son la presión de descarga de líquido y la presión en el separador CCGL respectivamente.  $C_{vL}$  y  $C_{vG}$  son los coeficientes de flujo de la válvula de líquido y gas respectivamente.  $N_7$  es una constante numérica,  $F_P$  es el factor geométrico de la tubería y  $Y$  es la expansión del gas.  $X$  es la relación de la caída de presión a la presión estática absoluta aguas-arriba.  $\gamma_G, \gamma_L$  son las gravedades específicas de gas y líquido.  $P_{CCGL\_Ajuste}$ , es la presión de ajuste.

La presión en el separador CCGL y el nivel de líquido o descarga de líquido pueden ser considerados como los parámetros de control. Los gastos de entrada de líquido y gas usualmente fluctúan debido al flujo de dos fases en la tubería de entrada, especialmente bajo condiciones de flujo bache. Esto puede causar que

la presión y el nivel de líquido en el separador CCGL fluctúan considerablemente durante su operación. Estas fluctuaciones afectan el comportamiento global del CCGL así como también el arrastre de líquido y gas dependen fuertemente del control del nivel de líquido en el separador compacto. El objetivo del sistema de control es suavizar estas fluctuaciones de presión y nivel de líquido en el separador y de este modo mejorar su comportamiento.

De tal manera de tener un mejor entendimiento del sistema de control, un diagrama de bloque simple es presentado en la figura 4.2. El respectivo sensor mide el parámetro controlado, en este caso la presión o el nivel de líquido en el separador CCGL, y envía la señal registrada al correspondiente transmisor. El transmisor neumático convierte la información en señal de presión que varía entre 3 y 15 psig. El error, el cual es la diferencia entre la presión de ajuste y la presión actual registrada por el transmisor, es enviado al controlador. El controlador (el cual puede ser Proporcional, Integral, Derivativo o una combinación de estos) envía la correspondiente señal de presión actuante a la válvula de control a través de las líneas neumáticas, de tal manera que éstas se abran o se cierran acordeamente<sup>29</sup>.



**Fig. 4.2 Diagrama de Bloque Simple del Sistema de Control.**

---

## 4.2 MODELO MATEMATICO

El objetivo del modelo matemático es simular la respuesta dinámica del separador CCGL y los subsistemas de control de gas y líquido. El modelo matemático debe ser lo suficientemente flexible para simular cualquier tipo de sistemas de control: Proporcional, Diferencial e Integral. El modelo debe aceptar cualquier tipo de entrada volumétrica en el separador permitiendo la simulación de cualquier escenario de producción. Finalmente, el modelo debe predecir la respuesta dinámica del separador CCGL acorde con la respuesta dinámica de cada uno de los dos subsistemas de control.

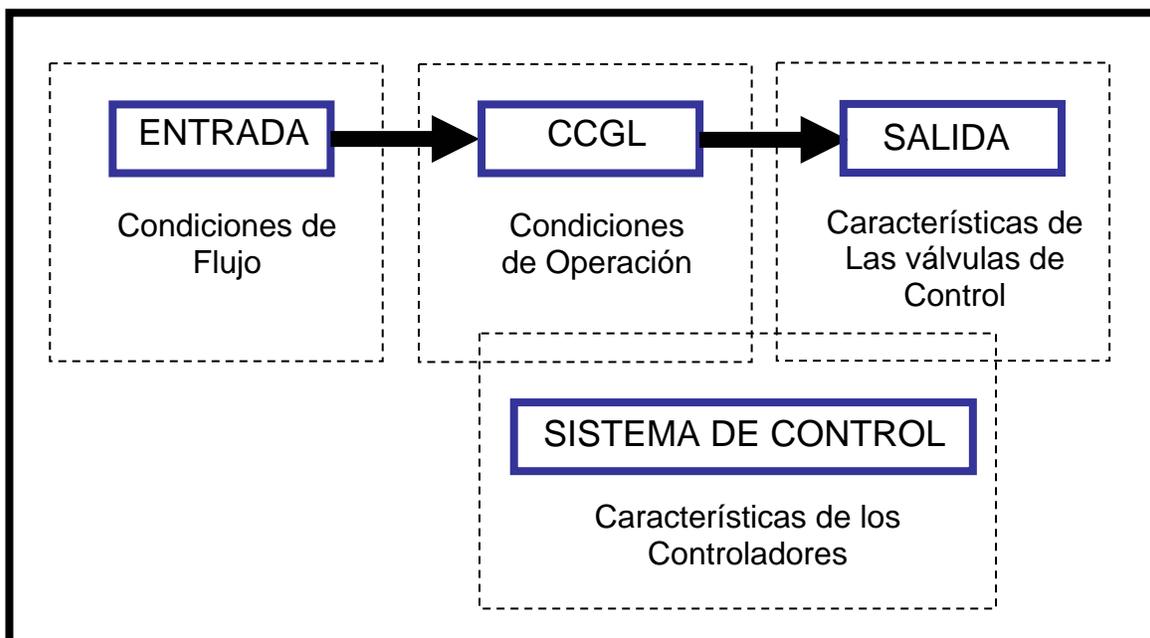
El modelo general del sistema de control dinámico del separador CCGL se puede observar en la Fig. (4.3). El sistema consiste en cuatro partes: entrada, separador CCGL, salidas y sistema de control. La entrada define las condiciones de flujo de entrada del gas y líquido. El separador CCGL define las condiciones de operación de los balances de masa de la fase líquida y gaseosa. Las salidas definen las condiciones de flujo de salida de gas y líquido basado en las características de las válvulas. El sistema de control provee la interfase entre el separador CCGL y las salidas basado en las características del sistema de control (controladores, sensores, actuadores, etc.). El modelo dinámico y el modelo para el sistema de control se desarrollaron bajo las siguientes suposiciones.

### 4.2.1 SUPOSICIONES DEL MODELO

Las suposiciones del modelo dinámico incluyen las siguientes:

1. La longitud de las tuberías de descarga de gas y líquido se consideran muy cortas y por lo tanto estas variables se desprecian en el modelo.

2. La línea de entrada de dos fases puede ser descrita en términos de gastos de flujo volumétrico de líquido y gas, los cuales son independientes de cualquier fluctuación de presión en el separador.
3. El posible arrastre de una fase en otra adentro del separador es despreciado.
4. Espumación y otras consideraciones físicas del fluido son ignoradas.
5. Temperatura en el separador y factor de compresibilidad del gas constante.
6. La fase líquida es incompresible y la transferencia de masa entre las fases es despreciada.
7. Los controles y subsistemas de control asociados son lineales.
8. A cualquier momento en el tiempo, la interfase entre la fase de gas y líquido esta bien definida.
9. Las líneas de descarga de gas y líquido operan a presión constante.
10. La altura de líquido puede ser calculada del volumen de líquido de esta fase en el separador.



**Fig. 4.3 Modelo General del Sistema de Control Dinámico del Separador CCGL .**

---

#### 4.2.2 MODELO MATEMATICO PARA EL SEPARADOR CCGL

De tal manera de poder describir los proceso físicos que ocurren en el separador ciclónico cilíndrico gas-líquido, a continuación se presentan las respectivas ecuaciones diferenciales que representan el modelo matemático del separador CCGL

##### Ecuaciones que describen la Geometría del separador CCGL

Se puede definir el volumen del líquido en el separador como función de la altura de líquido medida desde el fondo del separador. Este volumen es determinado usando la geometría del separador CCGL, el cual es un cilindro convencional de altura  $H$  y diámetro  $d$ :

$$Vol_{CCGL} = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) H \quad (4.3)$$

Donde  $Vol_{CCGL}$  es el volumen del separador,  $d$  es el diámetro del separador y  $H$  es su altura. También es importante definir el volumen máximo (cuando está en función de la altura  $H$ ) y mínimo (cuando  $H = 0$ ) del separador:

$$\begin{aligned} Vol_{CCGL\_min} &= Vol_{CCGL}(0) \\ Vol_{CCGL\_max} &= Vol_{CCGL}(H) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Los límites deseados de los volúmenes de líquido y gas son determinados por los correspondientes límites de ajuste para la altura de líquido en el separador. Específicamente, los puntos de ajuste máximo, mínimo y deseado para el volumen de líquido son calculados directamente por los puntos de ajuste máximo, mínimo y deseado de la altura de líquido. Los correspondientes puntos de ajuste máximo, mínimo y deseado para el volumen de gas son sólo una

consecuencia de los valores relacionados con el correspondiente volumen de líquido:

$$\begin{aligned}
 Vol_{L_{\min}} &= Vol_{CCGL}(H_{\min}) \\
 Vol_{L_{\max}} &= Vol_{CCGL}(H_{\max}) \\
 Vol_{L_{ajuste}} &= Vol_{CCGL}(H_{ajuste}) \\
 Vol_{G_{\min}} &= Vol_{CCGL_{\max}} - Vol_{CCGL}(H_{\max}) \\
 Vol_{G_{\max}} &= Vol_{CCGL_{\max}} - Vol_{CCGL}(H_{\min}) \\
 Vol_{G_{ajuste}} &= Vol_{CCGL_{\max}} - Vol_{CCGL}(H_{ajuste})
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

### Tasa de Cambio en el Volumen de Líquido

Debido a que la fase líquida en el separador es asumida incompresible e insensible a los cambios de temperatura, el cambio del volumen de líquido en el separador CCGL puede ser definido como la diferencia del gasto de flujo de entrada de líquido y el gasto de flujo de salida:

$$\frac{d(Vol)_L}{dt} = Q_{L_{entrada}} - Q_{L_{salida}} \tag{4.6}$$

### Tasa de Cambio en el Nivel de Líquido

Con la ecuación de la geometría del separador (4.3) se puede obtener la tasa de cambio en el nivel de líquido mediante una derivación de ambos miembros de la ecuación:

$$\begin{aligned}
 Vol_{CCGL} &= \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) H \\
 \frac{dVol_{CCGL}}{dt} &= \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \frac{dH}{dt} \\
 \frac{dH}{dt} &= \frac{1}{\left( \frac{\pi d^2}{4} \right)} \times \frac{d(Vol_{CCGL})}{dt}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

---

## Tasa de Cambio en el Volumen de Gas

La conservación de masa para la fase gaseosa en el separador puede ser expresada mediante la siguiente ecuación<sup>23</sup>:

$$\frac{dn_G}{dt} = (Q_{Gentrada} - Q_{Gsalida}) \frac{\rho_G}{M_G} \quad (4.8)$$

Donde  $Q_{Gentrada}$  es el gasto volumétrico de gas entrando al separador y  $Q_{Gsalida}$  es el gasto volumétrico de gas saliendo del separador,  $\rho_G$  es la densidad del gas y  $M_G$  es el peso molecular del gas.

La ecuación anterior también se puede escribir en función de la gravedad específica del gas, mediante la siguiente relación<sup>24</sup>:

$$\rho_G = 2.70 \frac{\gamma_G P}{TZ} \quad (4.9)$$

Sustituyendo la ecuación (4.9) en (4.8) queda:

$$\frac{dn_G}{dt} = (Q_{Gentrada} - Q_{Gsalida}) \frac{2.70 \gamma_G P}{M_G TZ} \quad (4.10)$$

## Tasa de Cambio de la Presión

La ecuación de estado para la fase gaseosa en el separador es:

$$P(Vol)_G = Zn_G RT \quad (4.11)$$

Donde  $P$  es la presión en el separador CCGL,  $n_G$  es el número de moles en el separador,  $R$  es la constante universal de los gases y  $T$  es la temperatura interna en el separador. Diferenciando la ecuación anterior con respecto al tiempo produce la siguiente EDO (Ecuación Diferencial Ordinaria):

$$(Vol)_G \frac{dP}{dt} = ZRT \frac{dn_G}{dt} - P \frac{d(Vol)_G}{dt} \quad (4.12)$$

Como el volumen del separador CCGL es constante, se puede obtener la siguiente relación de diferenciación de volúmenes:

$$\frac{d(Vol)_G}{dt} = -\frac{d(Vol)_L}{dt} = -(Q_{Lentrada} - Q_{Lsalida}) \quad (4.13)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.13 y 4.10) en (4.12) queda la siguiente ecuación que define perfectamente el cambio de la presión en el separador:

$$\begin{aligned} (Vol)_G \frac{dP}{dt} &= ZRT(Q_{Gentrada} - Q_{Gsalida}) \frac{2.70\gamma_G P}{M_G TZ} + P(Q_{Lentrada} - Q_{Lsalida}) \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{ZRT(Q_{Gentrada} - Q_{Gsalida}) \frac{2.70\gamma_G P}{M_G TZ} + P(Q_{Lentrada} - Q_{Lsalida})}{(Vol)_G} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Existe una función que relaciona el volumen de líquido en términos del volumen del separador y el volumen de gas como función del tiempo y se puede expresar como:

$$\begin{aligned} Vol_L(t) &= Vol_{CCGL} - Vol_G(t) \\ Vol_L(t) &= \frac{\pi d^2}{4} H(t) - Vol_G(t) \\ Vol_G &= (H_{CCGL} - H) \frac{\pi}{4} d^2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

---

Las ecuaciones (4.7) y (4.14) forman el modelo matemático para el separador CCGL. Los parámetros desconocidos son la presión  $P$  en separador CCGL, el nivel de líquido  $H$ , el gasto de líquido de salida  $Q_{Lsalida}$  y el gasto de gas de salida  $Q_{Gsalida}$ . Por lo tanto hay dos ecuaciones con 4 incógnitas. Se necesitan dos ecuaciones más para determinar los gastos de salida de las válvulas, los cuales dependen de los coeficientes de flujo correspondientes. Estas ecuaciones son derivadas en la sección 4.2.3.

### 4.2.3 MODELO MATEMATICO PARA EL SISTEMA DE CONTROL

El modelo del sistema de control provee las ecuaciones para el nivel dinámico y las posiciones de las válvulas de control. Basado en las características de flujo de las válvulas, los coeficientes de flujo pueden ser obtenidos de las correspondientes posiciones de las válvulas de control. El lazo de control consiste de controladores, sensores, válvulas de control y líneas de transmisión neumáticas. Las descripciones matemáticas de los componentes están dadas a continuación:

#### Ecuaciones de los Controladores

El controlador o compensador opera con una señal de error,  $e(t)$ , lo cual es una desviación del nivel de líquido o la presión con respecto al valor del punto de ajuste y genera la señal actuante,  $u(t)$ , la cual maneja la válvula de control. Un compensador típico posee tres modos básicos de operación: acción proporcional (P), en donde la señal actuante es proporcional a la señal de error, acción integral (I), donde la señal actuante es proporcional al tiempo integral de la señal de error y la acción derivativa (D), donde la señal actuante es proporcional al tiempo derivativo de la señal de error. Hay tres tipos básicos de controladores basados en las acciones descritas anteriormente: Proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D). Los controladores Proporcional-Integral (PI), Proporcional-

---

Derivativo (PD) y Proporcional-Integral-Derivativo (PID) son combinaciones de los primeros. El propósito principal del controlador integral es eliminar la desviación estable o comúnmente llamado “offset” que ocurre en un controlador proporcional cuando no opera en las condiciones de diseño. Los controladores derivativos pueden mejorar la respuesta del sistema debido a que ellos tienen la capacidad de predecir el futuro y toman decisiones acertadas.

La descripción básica de cómo una señal de entrada en el separador es convertida en un control retroalimentado es la siguiente<sup>29</sup>:

- ✓ La presión del gas o la altura de líquido son las señales a ser controladas en el separador.
- ✓ Los puntos de ajuste de señales máximo, mínimo y deseado son especificados por el usuario.
- ✓ Un transductor de señal es usado para producir una salida en el controlador.
- ✓ La respuesta del transductor es lineal.
- ✓ La salida del transductor es la entrada del controlador.
- ✓ Un tipo de controlador es usado para producir la señal de retroalimentación en el equipo controlado (usualmente una válvula de descarga de orificio).
- ✓ El porcentaje a la cual la válvula de descarga abre o cierra es determinado por la señal de retroalimentación del controlador, el tipo de válvula de control usado y la variación de la señal con respecto al punto de ajuste deseado.
- ✓ El gasto volumétrico en el cual el fluido sale del separador a las líneas de descarga es controlado por los coeficientes de descarga correspondientes al valor de abertura de la válvula y la presión diferencial entre el separador y la línea de flujo de descarga.

Para continuar con el desarrollo del modelo matemático del sistema de control se tiene que escoger una combinación de controladores para su modelado. Debido a que uno de los objetivos de este estudio es simular varios escenarios de producción con diferentes controladores, se va a proceder a evaluar diferentes combinaciones de estrategias de control. Por lo tanto, en la tabla 4.1 se muestran las combinaciones a ser consideradas en este estudio.

**Tabla 4.1. Combinación de los Controladores de Gas y Líquido.**

| <b>CASO</b> | <b>CONTROLADOR PARA EL NIVEL DE LIQUIDO</b> | <b>CONTROLADOR PARA LA PRESION DEL GAS</b> |
|-------------|---|--|
| 1           | Proporcional                                | Proporcional                               |
| 2           | Proporcional-Integral                       | Proporcional                               |
| 3           | Proporcional-Derivativo                     | Proporcional                               |
| 4           | Proporcional-Integral-Derivativo            | Proporcional                               |
| 5           | Proporcional                                | Proporcional-Integral                      |
| 6           | Proporcional                                | Proporcional-Derivativo                    |
| 7           | Proporcional                                | Proporcional-Integral-Derivativo           |
| 8           | Proporcional-Integral                       | Proporcional-Derivativo                    |
| <b>9</b>    | <b>Proporcional-Derivativo</b>              | <b>Proporcional-Integral</b>               |
| 10          | Proporcional-Integral-Derivativo            | Proporcional-Integral-Derivativo           |

De esta manera se va a proceder a desarrollar las ecuaciones del caso 9, los demás casos se pueden observar en el apéndice B. La descripción matemática de un controlador PI (Presión de Gas) está dada por<sup>6</sup>:

$$P_{cG} = P_{oG} + K_{cG} \left( e_G + \frac{1}{T_r} \int e_G dt \right) \quad (4.16)$$

$$P_{cG} = K_{cG} e_G + \frac{K_{cG}}{T_r} \int e_G dt + P_{oG}$$

---

En donde  $P_{cG}$  es la presión neumática a ser enviada a la válvula de control,  $P_{oG}$  es la presión inicial en el controlador,  $K_{cG}$  es la ganancia del controlador,  $e_g$  es el error,  $T_r$  es el tiempo de reiniciación y  $T_r = K_c T_i$ , donde  $T_i$  es el tiempo de integración.

Un transmisor lineal convierte el valor medido de la variable controlada en una señal de presión neumática en un rango de 3 a 15 psig (Ver Capítulo 2). La conversión del transmisor de control de presión es la siguiente:

$$\begin{aligned} P_{TG\min} &= 3\text{psig} & \text{si } P_{CCGL} &\leq P_{CCGL\min} \\ P_{TG\max} &= 15\text{psig} & \text{si } P_{CCGL} &\geq P_{CCGL\max} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Donde  $P_{TG\min}$  y  $P_{TG\max}$  son las mínimas y máximas señales de presión del transmisor respectivamente.  $P_{CCGL\min}$  y  $P_{CCGL\max}$  son las presiones mínimas y máximas en el separador arriba y abajo del punto de ajuste deseado especificado por el operador. Para presiones intermedias ( $P_{CCGL\min} < P_{CCGL} < P_{CCGL\max}$ ):

$$\begin{aligned} P_{TG} &= P_{TG\min} + P_{TG\max} (\Delta P_{TG}) \\ P_{TG} &= 3 + 12 \left( \frac{P_{CCGL} - P_{CCGL\min}}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \right) \end{aligned} \quad (4.18)$$

El punto de ajuste para el transductor de presión es determinado usando la presión de ajuste  $P_{CCGLajuste}$  del separador:

$$\begin{aligned} P_{TG\_ajuste} &= P_{TG\min} + P_{TG\max} (\Delta P_{TG}) \\ P_{TG\_ajuste} &= 3 + 12 \left( \frac{P_{CCGLajuste} - P_{CCGL\min}}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

Donde  $(P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min})$  es el rango de presión en el separador. La señal de error, la cual es la entrada del controlador y mide la discrepancia entre la presión actual y la presión de ajuste del transmisor puede ser definida como:

$$e_G = P_{TG\_ajuste} - P_{TG} \quad (4.20)$$

Por lo tanto, los valores del error correspondiente a los puntos mínimo, máximo y de ajuste de la señal de salida del transmisor son:

$$\begin{aligned} e_{G\min} &= P_{TG\_ajuste} - P_{TG\max} \\ e_{G\max} &= P_{TG\_ajuste} - P_{TG\min} \\ e_{Gajuste} &= P_{TG\_ajuste} - P_{TG\_ajuste} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.18) y (4.19) en (4.20) tenemos:

$$\begin{aligned} e_G &= \left[ 3 + 12 \frac{P_{CCGLajuste} - P_{CCGL\min}}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \right] - \left[ 3 + 12 \frac{P_{CCGL} - P_{CCGL\min}}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \right] \\ e_G &= 3 + 12 \frac{P_{CCGLajuste} - P_{CCGL\min}}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} - 3 - 12 \frac{P_{CCGL} - P_{CCGL\min}}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \\ e_G &= 12 \left( \frac{P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$e_G = K_{TG} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) \quad (4.23)$$

Donde

$$K_{TG} = \frac{12}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \quad (4.24)$$

Sustituyendo la ecuación (4.23) en la (4.16) tenemos:

---


$$P_{cG} = P_{oG} + K_{cG} \left( K_{TG} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) + \frac{1}{T_r} \int (K_{TG} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL})) dt \right) \quad (4.25)$$

$$P_{cG} = P_{oG} + K_{cG} K_{TG} \left( (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) + \frac{1}{T_r} \int (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) dt \right)$$

Diferenciando la ecuación anterior con respecto al tiempo proporciona una ecuación que representa la tasa de cambio de la presión neumática a ser enviada a la válvula de control del gas desde el controlador de la presión.

$$\frac{dP_{cG}}{dt} = -K_{cG} K_{TG} \frac{dP_{CCGL}}{dt} + \frac{K_{cG} K_{TG}}{T_r} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) \quad (4.26)$$

$$\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) \right)$$

Una vez descrita la ecuación para el controlador PI, a continuación se presenta la descripción matemática del controlador PD para el nivel de líquido<sup>6</sup>, lo que corresponde a la estrategia de control designada para el caso 9.

$$P_{cL} = P_{oL} + K_{cL} \left( e_L + T_D \frac{de_L}{dt} \right) \quad (4.27)$$

Donde,  $T_D$  es el tiempo derivativo. Similarmente la conversión del transmisor se aplica de igual forma como en la ecuación (4.17):

$$\begin{aligned} P_{TLmin} &= 3 \text{psig} & \text{si } H_{CCGL} \leq H_{CCGLmin} \\ P_{TLmax} &= 15 \text{psig} & \text{si } H_{CCGL} \geq H_{CCGLmax} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Donde  $H_{CCGLmin}$  y  $H_{CCGLmax}$  son los niveles mínimos y máximos en el separador arriba y abajo del nivel de ajuste deseado especificado por el operador. Para niveles de líquido intermedios ( $H_{CCGLmin} < H_{CCGL} < H_{CCGLmax}$ ):

$$P_{TL} = P_{TL\min} + P_{TL\max} (\Delta H_{TL})$$

$$P_{TL} = 3 + 12 \left( \frac{H_{CCGL} - H_{CCGL\min}}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}} \right) \quad (4.29)$$

El punto de ajuste para el transductor de nivel es determinado usando el nivel de líquido de ajuste  $H_{CCGLajuste}$  del separador:

$$P_{TL\_ajuste} = P_{TL\min} + P_{TL\max} (\Delta H_{TL})$$

$$P_{TL\_ajuste} = 3 + 12 \left( \frac{H_{CCGLajuste} - H_{CCGL\min}}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}} \right) \quad (4.30)$$

Donde  $(H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min})$  es el rango de nivel de líquido en el separador. La señal del error, los valores correspondientes al máximo, mínimo y punto de ajuste deseado y la ganancia del transmisor se pueden definir como:

$$e_L = P_{TL\_ajuste} - P_{TL} \quad (4.31)$$

$$e_{L\min} = P_{TL\_ajuste} - P_{TL\max}$$

$$e_{L\max} = P_{TL\_ajuste} - P_{TL\min} \quad (4.32)$$

$$e_{Lajuste} = P_{TL\_ajuste} - P_{TL\_ajuste}$$

$$e_L = K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) \quad (4.33)$$

$$K_{TL} = \frac{12}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}} \quad (4.34)$$

De esta manera la ecuación para el controlador PD queda como:

$$P_{cL} = P_{oL} + K_{cL} \left( K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) + T_D \frac{d(K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}))}{dt} \right)$$

$$P_{cL} = P_{oL} + K_{cL} K_{TL} \left( (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) + T_D \left( \frac{dH_{CCGLajuste}}{dt} - \frac{dH_{CCGL}}{dt} \right) \right)$$

Como  $H_{CCGLajuste}$  es una constante,  $\frac{dH_{CCGLajuste}}{dt} \approx 0$  y la expresión queda como:

---


$$P_{cL} = P_{oL} + K_{cL} K_{TL} \left( (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) - T_D \frac{dH_{CCGL}}{dt} \right) \quad (4.35)$$

Diferenciando con respecto al tiempo nos da la ecuación para la tasa de cambio de la presión neumática a ser enviada a la válvula de control de líquido desde el controlador de nivel de líquido:

$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right) \quad (4.36)$$

### Ecuaciones de la Línea de Transmisión Neumática

La señal de presión es enviada a través de una línea de transmisión neumática a la válvula de control desde el controlador (Ver Fig. 4.2). Por lo tanto, se produce un pequeño retraso que ocurre antes de que la señal llegue a la válvula. En este estudio, el retraso es tomado en cuenta con la siguiente expresión<sup>25</sup>:

$$P_v = P_c + (P_{vo} - P_c) e^{-t/\tau_o} \quad (4.37)$$

Donde  $P_v$  es la presión recibida en la válvula,  $P_{vo}$  es la presión inicial en la válvula y  $\tau_o$  es la constante de tiempo. La constante de tiempo es una función de la longitud de la transmisión de la línea. Diferenciando la ecuación (4.37) proporciona la tasa de cambio de la presión neumática actuando en la válvula de control en las líneas de descarga de gas y líquido.

$$\frac{dP_v}{dt} = \frac{dP_c}{dt} + P_{vo} \frac{de^{-t/\tau_o}}{dt} - \frac{d}{dt} \left( P_c e^{-t/\tau_o} \right)$$

tomando  $P_c \approx \text{constante} \rightarrow \text{tenemos} :$

$$\frac{dP_v}{dt} = -\frac{P_{vo} e^{-t/\tau_o}}{\tau_o} + \frac{P_c e^{-t/\tau_o}}{\tau_o} \rightarrow e^{-t/\tau_o} \approx 1 \quad (4.38)$$

Para la válvula de Líquido o Gas :

$$\frac{dP_{vL-G}}{dt} = \left( \frac{P_{cL-G} - P_{voL-G}}{\tau_{oL-G}} \right)$$

### Características de las Válvulas de Control

Las características de las válvulas de control proveen la relación entre la posición de la válvula de control y el coeficiente de flujo. Hay cuatro tipos básicos de características de flujo de válvulas de control como se muestra en la figura 4.4, las cuales son: lineales, de igual porcentaje, abertura rápida y parabólica<sup>22</sup>.

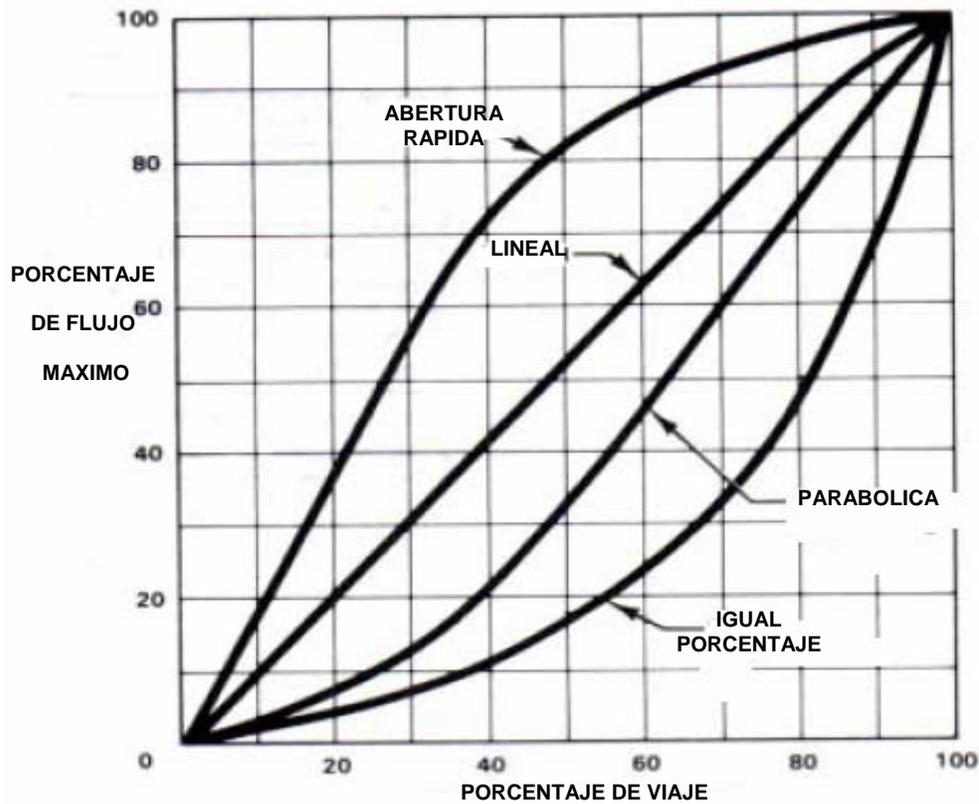


Fig. 4.4 Características de la Válvula de Control de Flujo.

---

La característica de flujo lineal provee una relación proporcional entre el gasto de flujo y el viaje de la válvula de control (posición de la válvula). Es comúnmente usado para control de nivel de líquido y para ciertas aplicaciones de control de flujo. En las de igual porcentaje, incrementos iguales en el viaje de la válvula produce cambios de porcentajes iguales en el flujo existente. Válvulas con igual porcentaje son generalmente usadas para aplicaciones de control de presión y para otras aplicaciones donde un gran porcentaje de la caída de presión es absorbido por el sistema mismo. En este estudio, las válvulas con características de flujo lineal son escogidas para el control del nivel de líquido y presión. La forma general de la relación entre el coeficiente de flujo de la válvula de control y la posición de la válvula es la siguiente<sup>22</sup>:

$$C_{vL-G} = f(x) \quad (4.39)$$

Donde  $x$  es la posición de la válvula de control (0-100%). Para una válvula de control específica esta relación puede ser determinada de la curva característica de la válvula de control proporcionada por el fabricante.

### **Ecuaciones de las Válvulas de Control**

La presión a la cual el separador es controlado mediante la abertura o cierre de la válvula que permite que el exceso de gas sea expulsado por la línea de descarga de gas es llamada la presión de control. Existen dos tipos de válvulas de control, aire para abrir y aire para cerrar. Las válvulas que son usadas comúnmente para sistemas de control en separadores son las del tipo aire para cerrar. Si la presión del aire falla, la presión y el nivel de líquido en el separador CCGL no se incrementará significativamente. El porcentaje de abertura de la válvula puede estar entre un 0 y 100%. Una ecuación diferencial de primer orden para la válvula de control de la presión del gas y para la válvula de control

de líquido fue desarrollada por Genceli y colaboradores<sup>26</sup> a partir de la Ec. (4.39):

$$\frac{d\chi_G}{dt} = \left( 15 - P_{vG} - \frac{12}{100} \chi_G \right) \frac{100}{12C_{oG}} \quad (4.40)$$

$$\frac{d\chi_L}{dt} = \left( 15 - P_{vL} - \frac{12}{100} \chi_L \right) \frac{100}{12C_{oL}} \quad (4.41)$$

Donde  $\chi_G, \chi_L$  son las posiciones de las válvulas,  $C_{oG}$  y  $C_{oL}$  son constantes, las cuales pueden ser determinadas experimentalmente. A condiciones iniciales,  $\chi(0) = 0$  y  $P_{vG} = 3$  psig. Cuando  $P_V$  es repentinamente cambiada a 15 psig (correspondiente a un paso de entrada) el tiempo requerido para que la posición alcance una posición arbitraria de abertura de la válvula  $\chi_{prueba}$  es  $t_{prueba}$  y la constante  $C_{oG}$  puede ser calculada como:

$$C_{oG} = \frac{t_{prueba}}{\ln \left[ \frac{100}{100 - \chi_{prueba}} \right]} \quad (4.42)$$

Una ecuación similar puede ser obtenida para el valor de  $C_{oL}$ . Finalmente el sistema de ecuaciones diferenciales para el modelo del sistema de control quedo conformado por las ecuaciones (4.26), (4.36), (4.38), (4.40) y (4.41).

### 4.3 APROXIMACIONES PARA RESOLVER EL SISTEMA DE ECUACIONES

Hay dos aproximaciones básicas para resolver un sistema de ecuaciones. Para ecuaciones diferenciales no-lineales, los métodos numéricos (método de integración), tanto explícito como implícito, pueden usarse dependiendo del procedimiento de estabilidad y la velocidad con que se alcanza la solución. Transformadas de Laplace pueden ser usadas para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales lineales o ecuaciones diferenciales linealizadas.

### 4.3.1 METODO NUMÉRICO PARA EL SISTEMA NO LINEAL

Las variables de salida del sistema son el nivel de líquido  $H$  y la presión  $P$  en el separador CCGL. De tal manera de resolver el sistema de ecuaciones para el nivel de líquido y presión a unas condiciones de entrada específicas, el modelo del separador CCGL (Ecs. 4.7 y 4.14) deben ser resueltas simultáneamente con el modelo del sistema de control (Ecs. 4.26, 4.36, 4.38, 4.40 y 4.41). En la Tabla 4.2 se presenta en forma detallada las ecuaciones diferenciales del modelo matemático que fueron desarrolladas anteriormente.

Tabla 4.2. Sistema de Ecuaciones Diferenciales. Caso 9.

| Ecuación | Expresión Matemática   |
|----------|--|
| 4.7      | $\frac{dH}{dt} = \frac{1}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} \times \frac{d(\text{Vol}_{CCGL})}{dt}$                                      |
| 4.14     | $\frac{dP}{dt} = \frac{ZRT(Q_{Gentrada} - Q_{Gsalida}) \frac{2.70\gamma_G P}{M_G TZ} + P(Q_{Lentrada} - Q_{Lsalida})}{(\text{Vol})_G}$ |
| 4.26     | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) \right)$                  |
| 4.36     | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right)$                              |
| 4.38     | $\frac{dP_{vL-G}}{dt} = \left( \frac{P_{cL-G} - P_{vol-G}}{\tau_{oL-G}} \right)$   |
| 4.40     | $\frac{d\chi_G}{dt} = \left( 15 - P_{vG} - \frac{12}{100} \chi_G \right) \frac{100}{12C_{oG}}$   |
| 4.41     | $\frac{d\chi_L}{dt} = \left( 15 - P_{vL} - \frac{12}{100} \chi_L \right) \frac{100}{12C_{oL}}$   |

---

De tal manera de poder resolver el sistema de ecuaciones, se necesitan las especificaciones del sistema, condiciones iniciales y las especificaciones de los controladores.

### **Especificaciones del Sistema**

Las especificaciones del sistema, incluyendo todos los parámetros de los componentes del sistema, están dados a continuación:

- ✓ Cuerpo del separador CCGL: diámetro,  $d_{CCGL}$  y altura total,  $H_{CCGL}$
- ✓ Válvula de control de gas: Coeficiente de flujo,  $C_{VG}$  y tiempo de respuesta  $C_{oG}$  (determinado experimentalmente).
- ✓ Válvula de control de líquido: Coeficiente de flujo,  $C_{VL}$  y tiempo de respuesta  $C_{oL}$  (determinado experimentalmente).
- ✓ Constantes de tiempo de la línea de transmisión neumática  $\tau_{oL}$  y  $\tau_{oG}$  para el lazo de control de líquido y gas respectivamente.

### **Condiciones Iniciales**

Se asume que inicialmente el sistema opera a condiciones de estado estacionario. El nivel de líquido y presión inicial corresponden a los respectivos puntos de ajuste del sistema. Las condiciones de flujo son los gastos de diseño de líquido y gas. Las posiciones de las válvulas de control de gas y líquido están diseñadas para estar 50% abiertas. La señal de presión neumática correspondiente a un 50% de abertura de la válvula de control es el punto de ajuste de la presión neumática. Para cualquier perturbación de gasto de flujo de gas o líquido de sus valores de estado estacionario, el sistema de ecuaciones debe ser resuelto para determinar el nivel dinámico de líquido y la presión en el separador CCGL. Para el sistema de control descrito en la Fig. 4.1, las

---

condiciones iniciales son las siguientes:  $H(0)=H_{ajuste}$ ,  $P(0)=P_{ajuste}$ ,  $Q_{Lsalida}=Q_{Linicial}$ ,  $Q_{Gsalida}=Q_{Ginicial}$ ,  $C_{vL}(0)=C_{vL\_ajuste}$ ,  $C_{vG}(0)=C_{vG\_ajuste}$ .

### 4.3.2 DESARROLLO DE UN SISTEMA LINEAL

Otra aproximación para resolver un sistema de ecuaciones es de transformar el sistema no lineal en un sistema lineal, mediante una transformación de sus variables. Este tipo de aproximación ha sido usado en algunos casos debido a la complejidad de los sistemas no lineales. El camino más conveniente es desarrollar un modelo lineal que aproxime el comportamiento dinámico de un sistema no lineal en un sistema parecido que opere bajo condiciones específicas. Esta aproximación es muy usada en el estudio de procesos dinámicos y diseños de sistemas de control. Las razones son<sup>3</sup>:

- ✓ Para sistemas lineales se pueden obtener soluciones analíticas. Por lo tanto se puede tener el comportamiento general del sistema.
- ✓ La mayoría de los descubrimientos de diseños efectivos de sistemas de control están disponibles para sistemas lineales.

Como el objetivo principal del estudio es realizar simulaciones dinámicas para observar el comportamiento del separador CCGL, se va a utilizar un modelo lineal para aproximar la solución del sistema de ecuaciones diferenciales.

#### 4.3.2.1 MODELO LINEAL EN FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.

Las funciones de transferencia (FT) lineal del sistema representan una descripción matemática del comportamiento del sistema y siempre están referidas en el dominio laplace. Estas funciones relacionan la desviación de variables o de perturbación en lugar de variables reales. El objetivo es suponer variaciones pequeñas alrededor del punto de operación de cada variable y tomar la transformada de Laplace para poder construir el diagrama de bloques lineal

del sistema de control de tal forma de encontrar su solución transitoria. A continuación se presenta el desarrollo matemático de las funciones por bloques para el caso 9. En el apéndice C se muestra el desarrollo de los demás casos.

### Diagrama de Bloque 1. Controlador del Nivel de Líquido PD

Tomando la ecuación general del controlador PD (4.26) y diferenciándola tenemos:

$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} \left( \frac{de_L}{dt} + T_D \frac{d^2e_L}{dt^2} \right) \quad (4.43)$$

Se definen las variables de perturbación o desviación. Estas variables representan la desviación de la variable con respecto a su estado estacionario o valor del punto de ajuste y van a ser denotadas como  $\Delta$ :

$$\Delta P_{cL} = P_{cL} - P_{cL\_ajuste} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta P_{cL}}{dt} = \frac{dP_{cL}}{dt} \quad (4.44)$$

$$\Delta e_L = e_L - e_{L\_ajuste} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta e_L}{dt} = \frac{de_L}{dt} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d^2\Delta e_L}{dt^2} = \frac{d^2e_L}{dt^2} \quad (4.45)$$

Introduciendo (4.44) y (4.45) en (4.43) se tiene:

$$\frac{d\Delta P_{cL}}{dt} = K_{cL} \left( \frac{d\Delta e_L}{dt} + T_D \frac{d^2\Delta e_L}{dt^2} \right) \quad (4.46)$$

Tomando la transformada de Laplace queda:

$$\begin{aligned} sP_{cL}^*(s) &= K_{cL} (se_L^*(s) + T_D s^2 e_L^*(s)) \\ P_{cL}^*(s) &= K_{cL} (e_L^*(s) + T_D se_L^*(s)) \\ \frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} &= K_{cL} (1 + T_D s) \end{aligned} \quad (4.47)$$

En la figura (4.5) se muestra el diagrama de bloque 1.

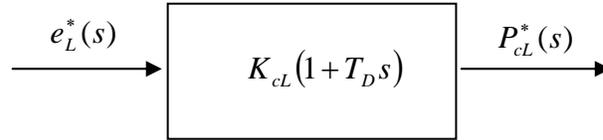


Fig. 4.5 Diagrama de Bloque 1. Controlador de Nivel PD.

### Diagrama de Bloque 2. Línea de Transmisión Neumática. Controlador PD

Corresponde a la función de transferencia de la línea de transmisión neumática del controlador de nivel de líquido. De la ecuación (4.37), las variables de perturbación son:

$$\Delta P_{vL} = P_{vL} - P_{vL\_ajuste} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta P_{vL}}{dt} = \frac{dP_{vL}}{dt} \quad (4.48)$$

$$\Delta P_{cL} = P_{cL} - P_{cL\_ajuste} \quad (4.49)$$

Sustituyendo en (4.37) nos queda:

$$\frac{d\Delta P_{vL}}{dt} = \frac{\Delta P_{cL} + P_{cL\_ajuste} - P_{voL}}{\tau_{oL}}$$

$$\text{Aproximando } \Delta P_{vL} \approx P_{cL\_ajuste} - P_{voL} \quad (4.50)$$

$$\frac{d\Delta P_{vL}}{dt} = \frac{\Delta P_{cL} - \Delta P_{vL}}{\tau_{oL}}$$

Tomando la transformada de Laplace se obtiene:

$$sP_{vL}^*(s) = \left( \frac{P_{cL}^* - P_{vL}^*}{\tau_{oL}} \right)$$

$$\tau_{oL} s P_{vL}^*(s) + P_{vL}^*(s) = P_{cL}^*(s) \quad (4.51)$$

$$P_{vL}^*(s) [\tau_{oL} s + 1] = P_{cL}^*(s)$$

$$\frac{P_{vL}^*(s)}{P_{cL}^*(s)} = \frac{1}{\tau_{oL} s + 1}$$

En la figura (4.6) se observa el diagrama de bloque 2.

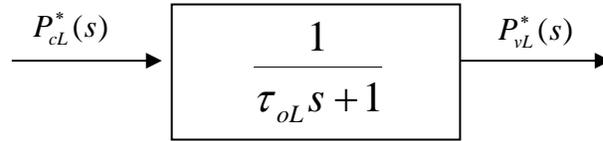


Fig. 4.6 Diagrama de Bloque 2. Línea de Transmisión Neumática. PD

### Diagrama de Bloque 3. Válvula de Control de Líquido

La ecuación diferencial para la válvula de control de líquido está dada por la ecuación (4.39). La variable de desviación es:

$$\Delta\chi_l = \chi_l - \chi_{ajuste} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta\chi_L}{dt} = \frac{d\chi_L}{dt} \quad (4.52)$$

La ecuación (4.39) se convierte en:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\chi_L}{dt} &= -\left( \frac{100\Delta P_{vL}}{12C_{oL}} + \frac{12}{100}\Delta\chi_L \frac{100}{12C_{oL}} \right) \\ \frac{d\Delta\chi_L}{dt} &= -\left( \frac{100\Delta P_{vL}}{12C_{oL}} + \frac{\Delta\chi_L}{C_{oL}} \right) \end{aligned} \quad (4.53)$$

Tomado la transformada de Laplace:

$$\begin{aligned} s\chi_L^*(s) &= -\left( \frac{100P_{vL}^*(s)}{12C_{oL}} + \frac{\chi_L^*(s)}{C_{oL}} \right) \\ s\chi_L^*(s)12C_{oL} &= -100P_{vL}^*(s) - 12\chi_L^*(s) \\ \chi_L^*(s)12[C_{oL}s + 1] &= -100P_{vL}^*(s) \\ \frac{\chi_L^*(s)}{P_{vL}^*} &= \frac{-100/12}{C_{oL}s + 1} \end{aligned} \quad (4.54)$$

En la figura (4.7) se ilustra el diagrama de bloque 3.

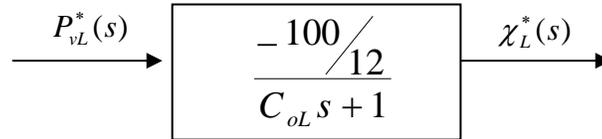


Fig. 4.7 Diagrama de Bloque 3. Válvula de Control de Líquido.

#### Diagrama de Bloque 4. Abertura de la Válvula de Líquido

Esta es la función de transferencia que relaciona el coeficiente de flujo con la apertura de la válvula de control de líquido<sup>26</sup>. Se toma la transformada de Laplace de la ecuación (4.39) y se obtiene:

$$\frac{C_{vL}^*(s)}{\chi_L^*(s)} = \left[ \frac{dC_{vL}}{d\chi_L} \right]_{\chi_L = \chi_{Lajuste}} \quad (4.55)$$

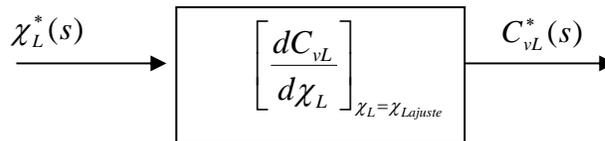


Fig. 4.8 Diagrama de Bloque 4. Abertura de la Válvula de Líquido.

#### Diagrama de Bloque 5. Relación Coeficiente de Flujo de Líquido

De tal manera de tener una función de transferencia lineal, la presión de ajuste en el separador CCGL es asumida constante ( $P_{ajuste}$ ). La relación entre el gasto de flujo de descarga de líquido y el coeficiente de flujo es dado en la Ec. (4.1).

$$Q_{Lsalida\_max} = 0.02228 \times C_{vL} \left( \frac{P - P_L}{\gamma_L} \right)^{0.5}$$

$$\frac{Q_{Lsalida\_max}}{C_{vL}} = 0.02228 \left( \frac{P_{Lajuste} - P_{Lsalida}}{\gamma_L} \right)^{0.5} \quad (4.56)$$

Definiendo las variables de perturbación y tomando transformada de Laplace, la ecuación anterior y el diagrama de bloque quedan como:

$$\frac{Q_{Lsalida\_max}^*(s)}{C_{vL}^*(s)} = 0.02228 \left( \frac{P_{Lajuste} - P_{Lsalida}}{\gamma_L} \right)^{0.5} = R_1 \quad (4.57)$$

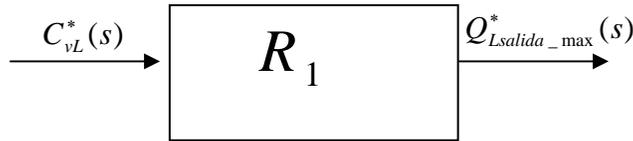


Fig. 4.9 Diagrama de Bloque 5. Relación Coeficiente de Flujo Líquido.

### Elemento Sumador de Señal 1 y Diagrama de Bloque 6.

En el elemento sumador 1, una perturbación es introducida al sistema. Las perturbaciones son las irregularidades en la entrada del flujo de líquido en el separador CCGL.

$$\Delta Q_{Lentrada} = Q_{Lentrada} - \bar{Q}_L \quad (4.58)$$

El elemento sumador determina la tasa de cambio del volumen de líquido de la manera siguiente:

$$\frac{d(Vol)_L}{dt} = \Delta Q_{Lentrada} - \Delta Q_{Lsalida} = (Q_{Lentrada} - \bar{Q}_L) - (Q_{Lsalida} - \bar{Q}_L) \quad (4.59)$$

Tomando la transformada de Laplace queda:

$$s(Vol_L^*)(s) = Q_{Lentrada}^*(s) - Q_{Lsalida}^*(s)$$

$$\frac{Vol_L^*(s)}{Q_{Lentrada}^*(s) - Q_{Lsalida}^*(s)} = \frac{1}{s} \quad (4.60)$$

Finalmente el elemento sumador 1 y el bloque 6 quedan como:

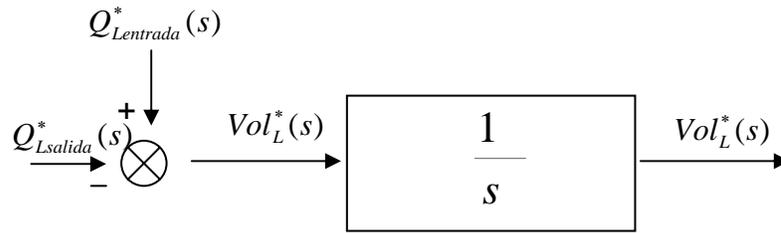


Fig. 4.10 Elemento Sumador 1 y Diagrama de Bloque 6.

### Diagrama de Bloque 7. Relación entre el Nivel de Líquido y el Volumen

La relación entre el nivel de líquido y el volumen del separador CCGL esta dado por la ecuación (4.7). Definiendo las variables de desviación de la Ec. (4.7) se tiene:

$$\Delta H = H - H_{ajuste} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta H}{dt} = \frac{dH}{dt}$$

$$\Delta Vol_{CCGL} = Vol_{CCGL} - Vol_{CCGL\_ajuste} \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta Vol_{CCGL}}{dt} = \frac{dVol_{CCGL}}{dt} \quad (4.61)$$

Introduciendo (4.61) en (4.7) y tomando transformada de Laplace:

$$\frac{d\Delta H}{dt} = \frac{1}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} \times \frac{d\Delta Vol_{CCGL}}{dt}$$

$$sH^*(s) = \frac{1}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} \times sVol_{CCGL}^*(s) \quad (4.62)$$

$$\frac{H^*(s)}{Vol_{CCGL}^*(s)} = \frac{1}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{4}{\pi d^2}$$

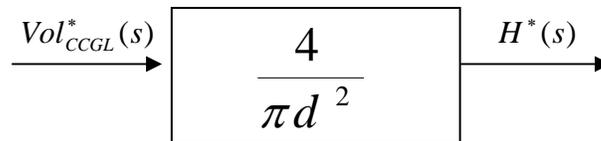


Fig. 4.11 Diagrama de Bloque 7. Relación Nivel de Líquido y Volumen.

### Diagrama de Bloque 8. Ganancia del Transmisor de Nivel de Líquido

La Ec. (4.33) define la ganancia del transmisor de nivel de líquido. Su respectiva función de transferencia queda como:

$$\frac{P_{TL}^*(s)}{H^*(s)} = \frac{12}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}} \quad (4.63)$$

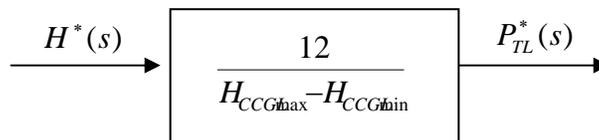


Fig. 4.12 Diagrama de Bloque 8. Ganancia del Transmisor de Nivel de Líquido.

---

## Diagrama de Bloque 9. Controlador de Presión de Gas PI

Tomando la Ec. (4.16) del controlador PI, diferenciándola y definiendo e introduciendo en la ecuación original sus respectivas variables de perturbación se obtiene:

$$\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} \left( \frac{de_G}{dt} + \frac{1}{T_r} e_G \right) \quad (4.64)$$

$$\Delta P_{cG} = P_{cG} - P_{cG\_ajuste} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta P_{cG}}{dt} = \frac{dP_{cG}}{dt} \quad (4.65)$$

$$\Delta e_G = e_G - e_{G\_ajuste} \rightarrow \rightarrow \rightarrow \frac{d\Delta e_G}{dt} = \frac{de_G}{dt} \quad (4.66)$$

$$\frac{d\Delta P_{cG}}{dt} = K_{cG} \left( \frac{d\Delta e_G}{dt} + \frac{1}{T_r} \Delta e_G \right) \quad (4.67)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} sP_{cG}^*(s) &= K_{cG} \left( s e_G^*(s) + \frac{1}{T_r} e_G^*(s) \right) \\ sP_{cG}^*(s) &= K_{cG} e_G^*(s) \left( s + \frac{1}{T_r} \right) \\ \frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} &= K_{cG} \left( \frac{s}{s} + \frac{1}{T_r s} \right) = K_{cG} \left( 1 + \frac{1}{T_r s} \right) \end{aligned} \quad (4.68)$$

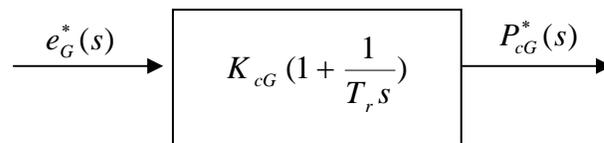


Fig. 4.13 Diagrama de Bloque 9. Controlador de Presión de Gas PI.

---

## Diagramas de Bloques 10,11 y 12.

Estas funciones de transferencias son obtenidas de igual forma que las funciones de los bloques 2, 3 y 4 respectivamente.

$$\frac{P_{vG}^*(s)}{P_{cG}^*(s)} = \frac{1}{\tau_{oG}s + 1} \quad (4.69)$$

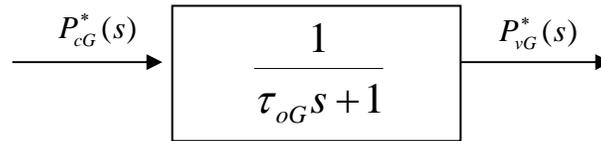


Fig. 4.14 Diagrama de Bloque 10. Línea de Transmisión Neumática. PI

$$\frac{\chi_G^*(s)}{P_{vG}^*(s)} = \frac{-100/12}{C_{oG}s + 1} \quad (4.70)$$

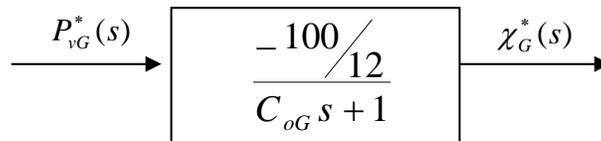


Fig. 4.15 Diagrama de Bloque 11. Válvula de Control de Gas.

$$\frac{C_{vG}^*(s)}{\chi_G^*(s)} = \left[ \frac{dC_{vG}}{d\chi_G} \right]_{\chi_G = \chi_{Gajuste}} \quad (4.71)$$

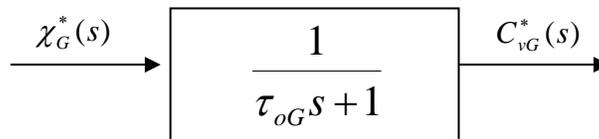


Fig. 4.16 Diagrama de Bloque 12. Abertura de la Válvula de Gas.

---

### Diagrama de Bloque 13. Relación Coeficiente de Flujo de Gas

El gasto de descarga de gas es relacionado con el coeficiente de flujo de la Ec. (4.2). Para obtener una expresión lineal, la presión en el separador CCGL deberá ser reemplazada por la presión de ajuste.

$$Q_{Gsalida\_max} = C_{vG} N_7 F_P P Y \sqrt{\frac{x}{\gamma_G T Z}} \quad (4.72)$$

$$\frac{Q_{Gsalida\_max}}{C_{vG}} = N_7 F_P P Y \sqrt{\frac{x}{\gamma_G T Z}}$$

Definiendo las variables de perturbación y tomando transformada de laplace, la ecuación anterior y el diagrama de bloque quedan como:

$$\frac{Q_{Gsalida\_max}^*(s)}{C_{vG}^*(s)} = N_7 F_P P Y \sqrt{\frac{x}{\gamma_G T Z}} = R_2 \quad (4.73)$$

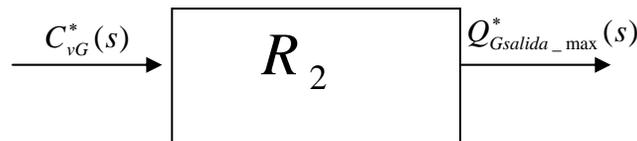


Fig. 4.17 Diagrama de Bloque 13. Relación Coeficiente de Flujo Gas.

### Elemento Sumador de Señal 2 y Diagrama de Bloque 14.

El elemento sumador de señal 2 determina el flujo neto en el separador CCGL. De este modo, la salida del elemento sumador en variables de desviación puede ser definida como:

$$Flujo\_Neto = (\Delta Q_{Lentrada} + \Delta Q_{Gentrada}) - (\Delta Q_{Lsalida} + \Delta Q_{Gsalida}) \quad (4.74)$$

Se convierten la Ec. (4.6) y la Ec. (4.10) en variables de desviación:

$$\frac{d\Delta(Vol)_L}{dt} = \Delta Q_{Lentrada} - \Delta Q_{Lsalida} \quad (4.75)$$

$$\frac{d\Delta n_G}{dt} = (\Delta Q_{Gentrada} - \Delta Q_{Gsalida}) \frac{2.70\gamma_G P}{M_G T Z} \quad (4.76)$$

$$\frac{d\Delta n_G}{dt} \frac{M_G T Z}{2.70\gamma_G P} = (\Delta Q_{Gentrada} - \Delta Q_{Gsalida})$$

Rescribiendo la Ec. (4.74):

$$Flujo\_Neto = (\Delta Q_{Lentrada} - \Delta Q_{Lsalida}) + (\Delta Q_{Gentrada} - \Delta Q_{Gsalida}) \quad (4.74')$$

Introduciendo (4.75) y (4.76) en (4.74'):

$$Flujo\_Neto = \left( \frac{d\Delta(Vol)_L}{dt} \right) + \left( \frac{d\Delta n_G}{dt} \frac{M_G T Z}{2.70\gamma_G P} \right) \quad (4.77)$$

Igualando (4.77) con (4.74'):

$$(\Delta Q_{Lentrada} - \Delta Q_{Lsalida}) + (\Delta Q_{Gentrada} - \Delta Q_{Gsalida}) = \left( \frac{d\Delta(Vol)_L}{dt} \right) + \left( \frac{d\Delta n_G}{dt} \frac{M_G T Z}{2.70\gamma_G P} \right) \quad (4.78)$$

Tomando la transformada de Laplace:

$$(Q_{Lentrada}^*(s) - Q_{Lsalida}^*(s)) + (Q_{Gentrada}^*(s) - Q_{Gsalida}^*(s)) = (s Vol_L^*(s)) + \left( s n_G^*(s) \frac{M_G T Z}{2.70\gamma_G P} \right) \quad (4.79)$$

$$(Q_{Lentrada}^*(s) - Q_{Lsalida}^*(s)) + (Q_{Gentrada}^*(s) - Q_{Gsalida}^*(s)) = s \left[ Vol_L^*(s) + n_G^*(s) \frac{M_G T Z}{2.70\gamma_G P} \right] \quad (4.80)$$

$$\frac{\left( Vol_L^*(s) + n_G^*(s) \frac{M_G TZ}{2.70 \gamma_G P} \right)}{\left( (Q_{Lentrada}^*(s) - Q_{Lsalida}^*(s)) + (Q_{Gentrada}^*(s) - Q_{Gsalida}^*(s)) \right)} = \frac{1}{s} \quad (4.81)$$

$$\frac{(Vol_L^*(s) + Vol_G^*(s))}{\left( (Q_{Lentrada}^*(s) - Q_{Lsalida}^*(s)) + (Q_{Gentrada}^*(s) - Q_{Gsalida}^*(s)) \right)} = \frac{1}{s} \quad (4.82)$$

$$\frac{(Vol_L^*(s) + Vol_G^*(s))}{(Vol_L^*(s) + Vol_G^*(s))} = \frac{1}{s} \quad (4.83)$$

Finalmente el elemento sumador 2 y el diagrama de bloque 14 quedan como:

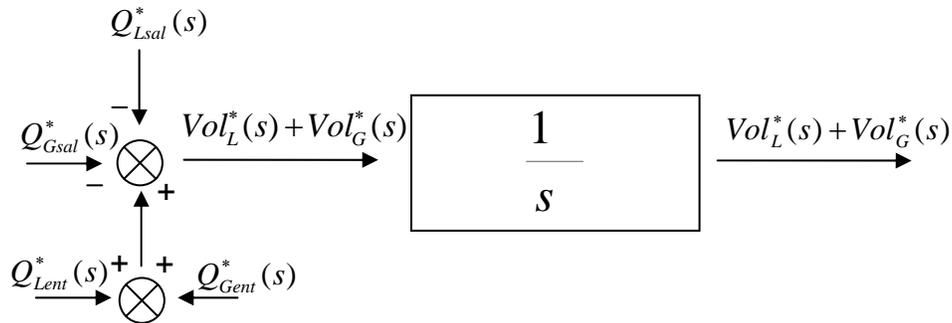


Fig. 4.18 Elemento Sumador 2 y Diagrama de Bloque 14.

### Diagrama de Bloque 15. Relación entre el Flujo Neto y la Presión

Esta función de transferencia relaciona el flujo neto entrando al separador CCGL con la tasa de cambio de la presión en el separador. La ecuación diferencial fue dada en la Ec. (4.12). De tal manera de obtener una relación lineal, la presión  $P$  es reemplazada por la presión de ajuste  $P_{ajuste}$  y el volumen del gas ( $Vol_G$ ) por  $(Vol_G) = (Vol)_{CCGL} - (Vol)_{Lajuste}$ , obteniéndose la siguiente relación:

$$\frac{\Delta P_{CCGL}}{\Delta (Vol)} = \frac{P_{ajuste}}{(Vol)_{CCGL} - (Vol)_{Lajuste}} \quad (4.84)$$

Tomando la transformada de Laplace:

$$\frac{P_{CCGL}^*(s)}{Vol^*(s)} = \frac{P_{ajuste}}{(Vol)_{CCGL} - (Vol)_{Lajuste}} = R_3 \quad (4.85)$$

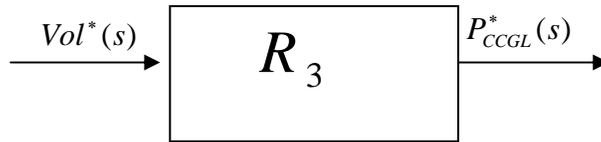


Fig. 4.19 Diagrama de Bloque 15. Relación entre el Flujo Neto y la Presión.

### Diagrama de Bloque 16. Ganancia del Transmisor de Presión

La Ec. (4.23) define la ganancia del transmisor de presión. Su respectiva función de transferencia quedaría como:

$$\frac{P_{TG}^*(s)}{P_{CCGL}^*(s)} = \frac{12}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}} \quad (4.86)$$

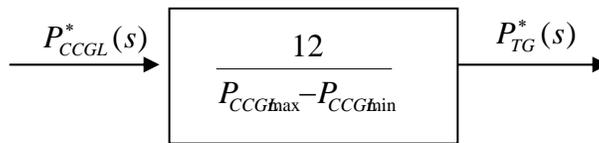


Fig. 4.20 Diagrama de Bloque 8. Ganancia del Transmisor de Nivel de Líquido.

La entrada al sistema son las desviaciones de los puntos de ajustes. Debido a que ninguna desviación es esperada de los puntos de ajustes, las entradas son cero, por lo tanto, los puntos sumadores determinan los errores como:

$$\Delta e_L = -\Delta P_{TL} \quad \text{y} \quad \Delta e_G = -\Delta P_{TG} \quad (4.87 \text{ y } 4.88)$$

A continuación se presenta el diagrama de bloque general del sistema de control para el caso 9 (Ver Fig. 4.20). Para los demás casos en estudio ver apéndice C. En el capítulo 5 se muestra la validación del modelo planteado utilizando datos experimentales que fueron tomados en la Universidad de Tulsa.

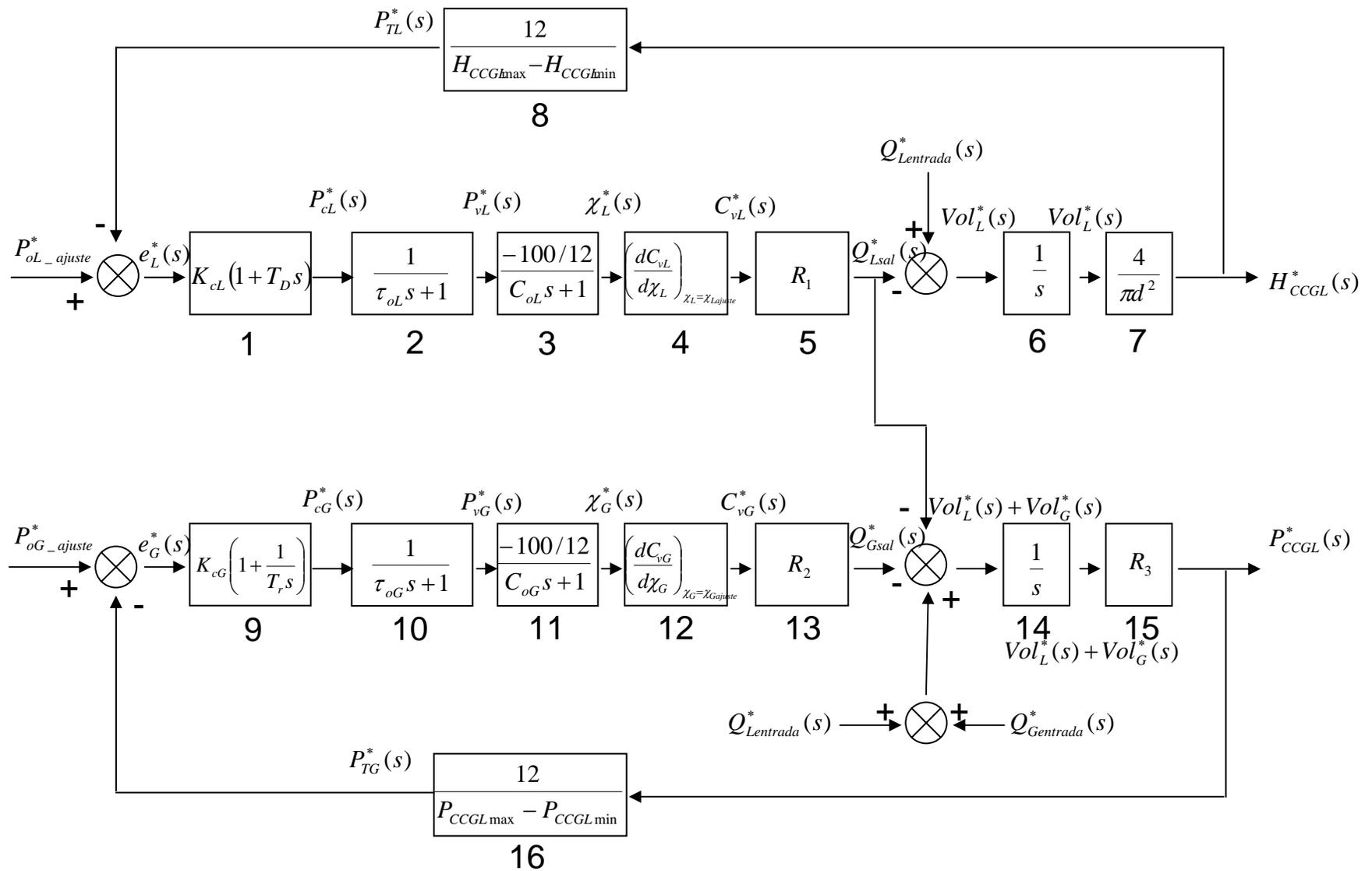


Fig. 4.21 Diagrama de Bloque General del Sistema de Control. Caso 9.

---

## 5. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Es muy recomendable validar el modelo matemático propuesto usando datos experimentales. De tal manera de lograr esta validación, un conjunto de datos precisos necesitan estar disponibles. Sin embargo, el objetivo de este proyecto no incluye una adquisición formal de datos. Por lo tanto, cualquier dato que se utilice para validar el modelo debe ser obtenido de otras fuentes.

El grupo de investigación de proyectos de separación del Departamento de Petróleo de la Universidad de Tulsa ha fabricado un separador ciclónico cilíndrico gas-líquido, el cual es usado para obtener datos experimentales<sup>27</sup>.



Fig. 5.1 Separador CCGL fabricado en la U. Tulsa. Sección de Prueba.

## 5.1 DESCRIPCIÓN DEL SEPARADOR CCGL DE PRUEBA

El cuerpo del separador CCGL se constituye de una tubería transparente PVC de 3 pg. con una tubería tangencial de entrada fabricada de aluminio de 3 pg. de diámetro. La altura total del separador CCGL es de 7 pies, el cual se encuentra dividido por la tubería de entrada en dos secciones, la sección baja de líquido y la sección alta de gas. La tubería de salida de líquido es de 2 pg. fabricada con material PVC de color gris y tiene una válvula de control instalada. Un transductor de presión diferencial esta montado en el CCGL para medir el nivel de líquido. La tubería de salida del gas es también de 2 pg. de material PVC color gris y tiene una válvula de control de gas y un transductor de presión absoluto para medir la presión del CCGL. La sección de salida es construida para ser utilizada como una aplicación de lazo de medición mediante la recombinación del gas y líquido o para separar las corrientes de líquido y gas. La figura 5.2 muestra el esquemático de la sección de prueba del separador CCGL de la Universidad de Tulsa<sup>27</sup>.

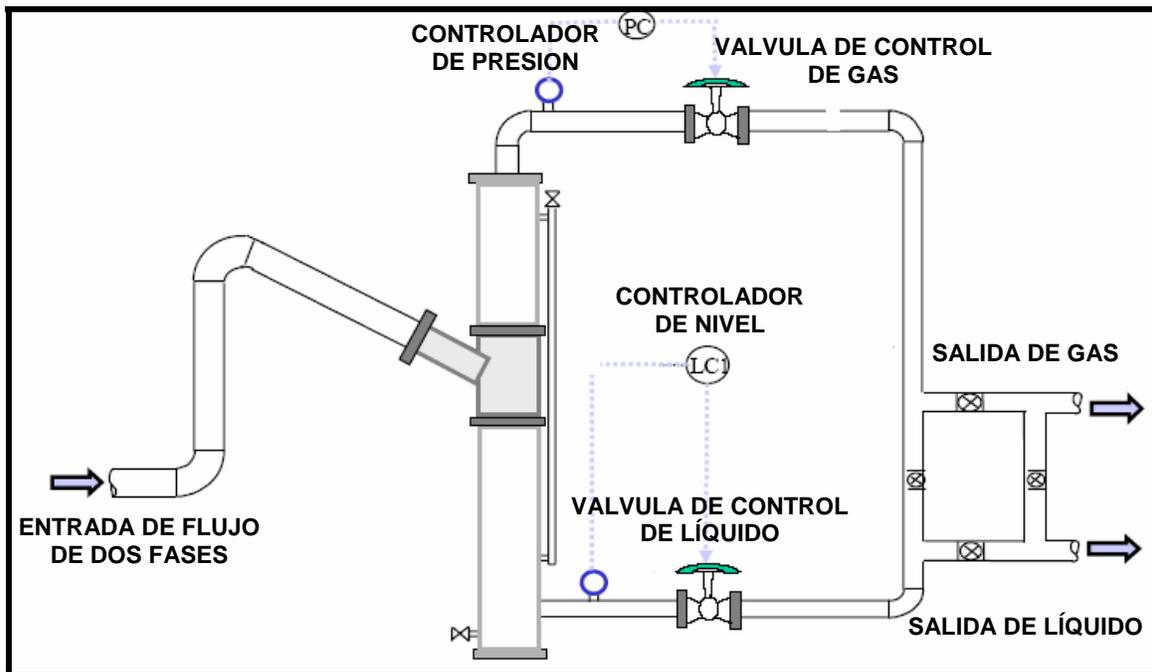


Fig. 5.2 Esquemático del CCGL fabricado en la U. Tulsa. Sección de Prueba.

---

Para simular la entrada de gas se utiliza aire, el cual es suministrado a un tanque mediante un compresor con una capacidad de 250 MPC @ 120 psig. El gasto de flujo de gas en el lazo es controlado mediante una válvula de regulación y es medido usando un medidor de flujo másico y un medidor de orificio. La fase líquida es suministrada de un tanque de almacenamiento de 40 galones a presión atmosférica. El gasto de flujo de líquido es controlado mediante una válvula de regulación y es medido usando medidores de orificio y de flujo másico, igual que la fase gaseosa. Hay un medidor de flujo másico que mide la densidad y temperatura de la fase líquida. Válvulas check están colocadas aguas-abajo de cada tubería de salida para prevenir el contraflujo. Las corrientes de las fases de gas y líquido son recombinadas. El gas es venteado a la atmósfera y el líquido es retornado al tanque de almacenamiento para completar el ciclo. Todas las señales de salida son transferidas de un panel central a la computadora. Una estrategia de control es usada basada en aproximaciones clásicas usando una válvula de control de nivel de líquido y una válvula de control de gas para la presión del separador CCGL. Un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es usado para regular las fases líquida y gaseosa.

## **5.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Los resultados experimentales incluyen casos en donde el nivel de líquido, la presión en el separador CCGL y la respuesta de la válvula líquido es medida. En todos los casos, la velocidad superficial del líquido ( $V_{sl}$ ) y gas ( $V_{sg}$ ) en la entrada del separador de prueba cambian dinámicamente. Para verificar parcialmente el modelo matemático presentado en este estudio, se recolectaron datos dinámicos de trabajos anteriores.

Los experimentos llevados a cabo en la Universidad de Tulsa para estudiar la dinámica del sistema fueron hechos acorde al siguiente procedimiento<sup>14</sup>:

1. Implementar las estrategias de control en el panel del computador.
2. Introducir los parámetros de diseño de los controladores y los valores de ajuste de las variables de control, como nivel de líquido en el separador o presión.
3. Introducir las condiciones de flujo del gas y líquido, a la cual la prueba es llevada a cabo.
4. Esperar hasta que el flujo de gas y líquido se estabilicen.
5. Introducir perturbaciones de flujo al sistema mediante una entrada tipo escalón. Adquirir data de la respuesta del sistema.
6. Modificar las condiciones de flujo para los mismos controladores para probar la sensibilidad de la respuesta del sistema al cambio de las condiciones de flujo.

En la tabla 5.1 se presentan algunos de los datos con que fue llevado a cabo el experimento que se va a utilizar para validar el modelo matemático:

**Tabla 5.1 Datos Generales del Experimento.**

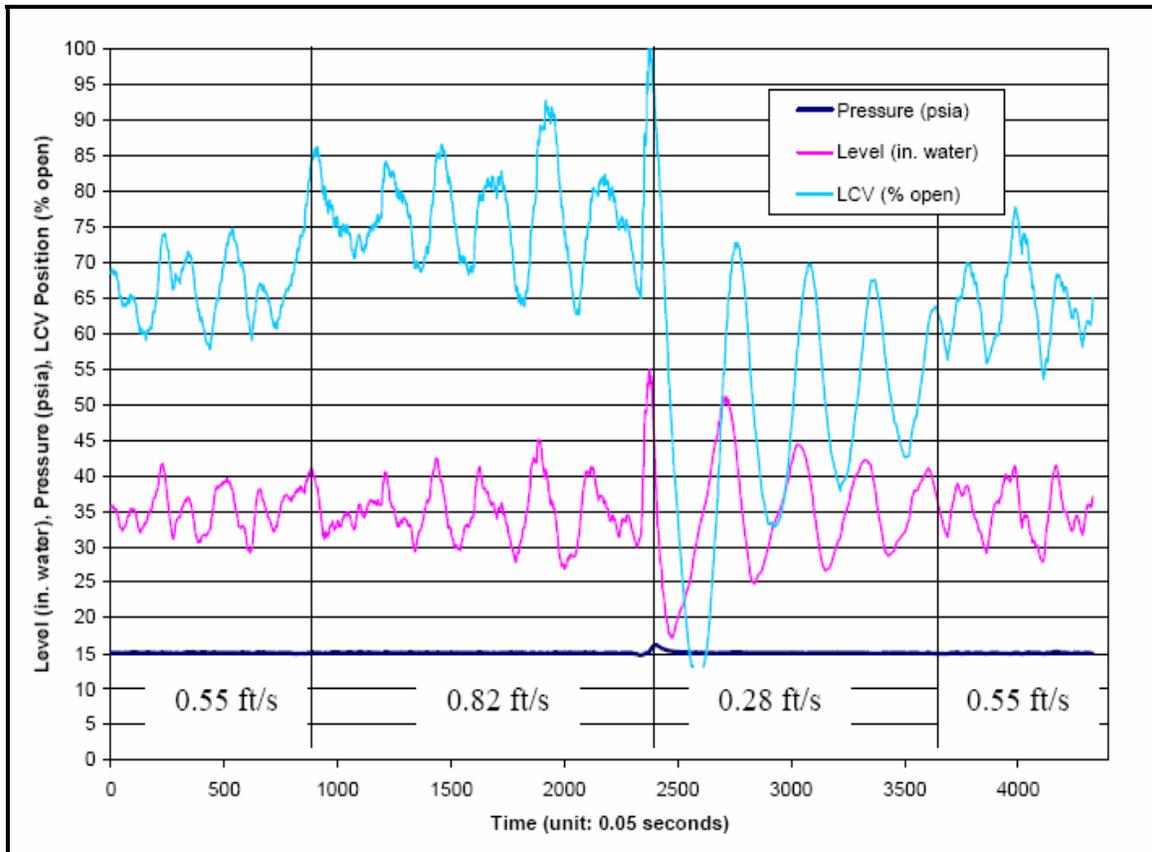
| DATOS                 | VALORES                            |
|-----------------------|------------------------------------|
| $H_{CCGL}$            | 7 pies                             |
| $d_{CCGL}$            | 0.25 pies                          |
| $V_{sl}$              | 0.55-0.82 pies/seg                 |
| $Q_l$                 | 0.027-0.044 pies <sup>3</sup> /seg |
| $V_{sg}$              | 18 pies/seg                        |
| $Q_g$                 | 0.88 pies <sup>3</sup> /seg        |
| $P_{CCGL\_ajuste}$    | 15 psia                            |
| $H_{CCGL\_ajuste}$    | 2.91 pies = 35 pg                  |
| $T$                   | 80 F                               |
| $\gamma_l = \gamma_g$ | 1                                  |

Los controladores que se utilizaron en la prueba fueron de tipo Proporcional-Integral-Derivativo, con las siguientes características.

**Tabla 5.2 Características de los Controladores utilizados en la Prueba.**

| CONTROLADOR LIQUIDO | CONTROLADOR GAS |
|---------------------|-----------------|
| $K_P=0.53$          | $K_P=0.203$     |
| $T_{iL}=0.11$       | $T_{iG}=0.014$  |
| $T_{DL}=0.59$       | $T_{DG}=0.676$  |

En la figura 5.3 se presenta la gráfica correspondiente al nivel de líquido, porcentaje de abertura de la válvula de líquido y presión medida en el separador de prueba<sup>14</sup>.



**Fig. 5.3 Resultados Prueba Experimental.**

---

Como se observa en la gráfica anterior, la velocidad inicial de entrada de líquido fue de 0.55 pies/seg, correspondiente a un gasto de 0.027 pies<sup>3</sup>/seg, durante los primeros 50 segundos de experimento, después la velocidad de líquido aumento en 0.27 pies/seg originando una velocidad total de 0.82 pies/seg, lo que corresponde a un gasto de 0.044 pies<sup>3</sup>/seg, esto se mantuvo hasta los primeros 150 segundos de experimento. Aquí se observa como se simulo la entrada de un bache de líquido al sistema. Después de un tiempo la velocidad de líquido fue bajada en 0.54 pies/seg desde su valor más alto de 0.82 pies/seg llegando a una velocidad de 0.28 pies/seg y por último la velocidad fue incrementada hasta su valor inicial. Es importante destacar que las unidades de tiempo en la gráfica de la prueba experimental van de 500 en 500, pero realmente hay que multiplicarlas por el factor de la unidad de tiempo de 0.05 segundos, lo que corresponde a unidades reales de 25 en 25 segundos.

Para las condiciones de flujo de la prueba, el nivel de líquido fue controlado alrededor del nivel de ajuste ( $35 \text{ pg} \pm 5 \text{ pg} = 2.916 \text{ pies} \pm 0.416 \text{ pies}$ ). Durante los primeros 150 segundos de simulación el valor promedio del nivel de líquido fue de alrededor de 35 pg o 2.916 pies.

La válvula de control de líquido se estabiliza en diferentes posiciones a diferentes gastos de líquido. El promedio de la posición de la válvula de control es alrededor del 65% abierta a condiciones de flujo normal (primeros 50 segundos), 75% abierta cuando el gasto de líquido aumenta (50-150 segundos) y 55% abierta cuando el gasto de líquido disminuye a su valor más bajo. La presión en el separador de prueba CCGL permanece constante en 15 psia para todas las condiciones de flujo debido a que el gasto de gas no cambia. En esta prueba experimental no se midió el comportamiento de la válvula de gas.

---

### 5.3 PREDICCIONES DEL MODELO

Las entradas para el modelo matemático son el flujo instantáneo de líquido y gas en el separador CCGL. Estos valores son calculados de las velocidades superficiales de líquido y gas. Los valores experimentales mostrados en la figura 5.3 van a tratar de ser reproducidos por el modelo matemático propuesto en el capítulo 4 con la ayuda del simulador comercial Matlab a través de uno de sus módulos llamado Simulink, el cual tiene la capacidad de resolver sistemas de control mediante la construcción del diagrama general de bloques de funciones de transferencia e introduciendo los valores iniciales y constantes del sistema. El método de solución del sistema de ecuaciones diferenciales lineales utilizado por el simulador Matlab es el de Dormand-Price con una tolerancia de  $1 \times 10^{-3}$ , esto fue fijado en las condiciones de entrada del simulador. En el apéndice D se muestra el procedimiento para construir el diagrama de bloques generado en el capítulo 4 y el funcionamiento y ventajas del simulador Matlab/Simulink.

Debido a que una función escalón es usada para representar la entrada de gasto de flujo al modelo, la similitud entre las predicciones del modelo y los datos experimentales van a ser cualitativas en lugar de cuantitativas. Es importante resaltar que no todos los datos necesarios para resolver el modelo matemático fueron encontrados en las referencias de donde se tomaron las pruebas experimentales, así que se tomaron algunos valores comerciales para poder realizar las simulaciones necesarias. La mayoría de los datos ajustados fueron las características de las válvulas y los controladores. En la tabla 5.2 se muestran los datos introducidos al simulador.

**Tabla 5.3 Datos de entrada al Simulador. Validación del Modelo**

| <b>Nomenclatura</b>   | <b>Significado</b>   | <b>Valor</b>                       |
|---|--|------------------------------------|
| $d_{CCGL}$  | Diámetro del CCGL  | 0.25 pies                          |
| $H_{CCGL}$  | Altura total del CCGL  | 7 pies                             |
| $Q_l$   | Gasto de entrada de Líquido  | 0.027-0.044 pies <sup>3</sup> /seg |
| $P_{CCGL\_ajuste}$  | Presión de Ajuste  | 15 psia                            |
| $P_L$   | Presión de descarga de Líquido   | 10 psia                            |
| $P_{CCGLmax}$   | Presión Máxima   | 17 psia                            |
| $P_{CCGLmin}$   | Presión Mínima   | 13 psia                            |
| $\gamma_L$  | Gravedad específica del Líquido  | 1                                  |
| $H_{CCGLmax}$   | Nivel Máximo CCGL  | 5 pies                             |
| $H_{CCGL\_ajuste}$  | Nivel de Ajuste CCGL   | 35 pg = 2.91 pies                  |
| $H_{CCGLmin}$   | Nivel Mínimo CCGL  | 2 pies                             |
| $\left(\frac{dC_{vL}}{d\chi_L}\right) = \left(\frac{dC_{vG}}{d\chi_G}\right)$ | Característica de la Válvula de Control del cambio del coeficiente de flujo con el cambio del porcentaje de abertura | 0.5                                |
| $C_{oL}=C_{oG}$   | Parámetro de la Válvula de Control relacionado al tiempo de respuesta de la Válvula                                  | 2 seg                              |
| $C_{vL}=C_{vG}$   | Coefficiente de Flujo de la Válvula de Control para 50% de abertura  | 28                                 |
| $\tau_{oL} = \tau_{oG}$   | Ctte. de tiempo de la Línea Neumática de Transmisión   | 0.4 seg                            |
| $Q_G$   | Gasto de entrada de Gas  | 0.882 pies <sup>3</sup> /seg       |
| $\gamma_G$  | Gravedad específica del Gas  | 1                                  |
| $M_G$   | Masa Molecular del Gas   | 20 lb/lb-mol                       |
| $Z$   | Factor de Compresibilidad del Gas  | 1                                  |
| $Y$   | Factor de Expansión  | 1                                  |
| $N_7$   | Constante Numérica   | 0.37                               |
| $T$   | Temperatura de Operación   | 80 F                               |
| $F_p$   | Factor Geométrico de la Tubería  | 0.4                                |
| $x$   | Caída de Presión ( $P_{CCGL\_ajuste} - P_L$ )  | 5                                  |

De esta manera se pueden calcular las constantes o ganancias del diagrama general de bloque mostrado en la figura 4.20 (Ver Capítulo 4).

**Tabla 5.4 Cálculo de las Ganancias. Validación del Modelo.**

| Bloque | Relación                                 | Valor |
|--------|--|-------|
| 5      | $R_1$                                    | 0.05  |
| 7      | $\frac{4}{\pi d^2}$                      | 20.37 |
| 8      | $\frac{12}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}}$ | 4     |
| 13     | $R_2$                                    | 0.55  |
| 15     | $R_3$                                    | 1.49  |
| 16     | $\frac{12}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}}$ | 3     |

Lo último que faltaría por definir son las ganancias de los controladores y los correspondientes tiempos integrales y derivativos, los cuales van a ser fijados con los mismos valores que la prueba experimental.

**Tabla 5.5. Ganancias de los Controladores. Validación del Modelo.**

| Controlador de Nivel de Líquido | Controlador de Presión de Gas |
|---------------------------------|-------------------------------|
| $K_{cL} = 0.53$                 | $K_{cG} = 0.203$              |
| $T_{iL} = 0.11$                 | $T_{iG} = 0.014$              |
| $T_{dL} = 0.59$                 | $T_{dG} = 0.676$              |

Donde  $K_{cL}$  y  $K_{cG}$  representan las ganancias de los controladores,  $T_{iL}$  y  $T_{iG}$  los tiempos de integración y por último  $T_{dL}$  y  $T_{dG}$  representan los tiempos derivativos de los controladores de líquido y gas respectivamente. En la figura 5.4 se muestra el simulador construido en Matlab/Simulink para la validación del modelo.

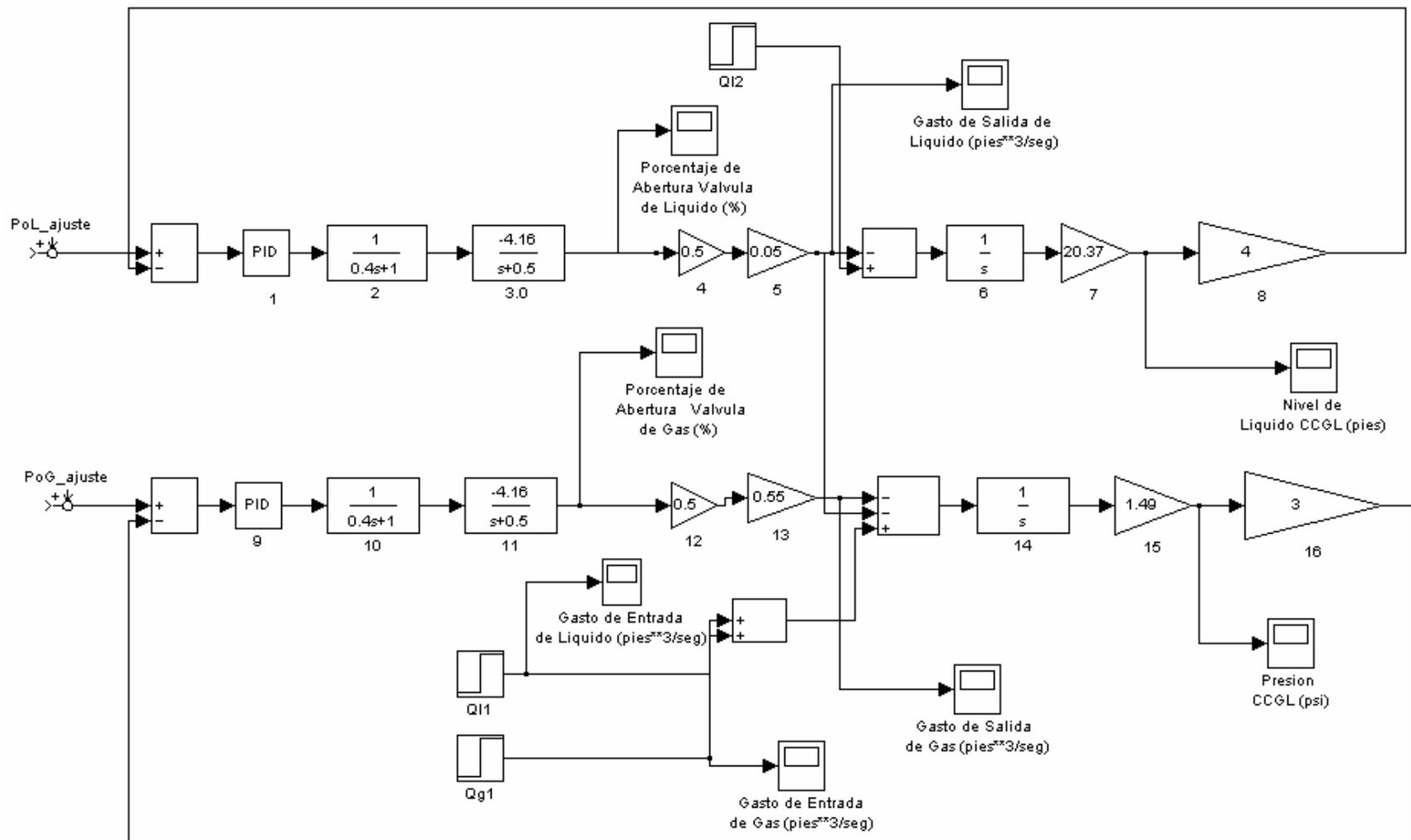
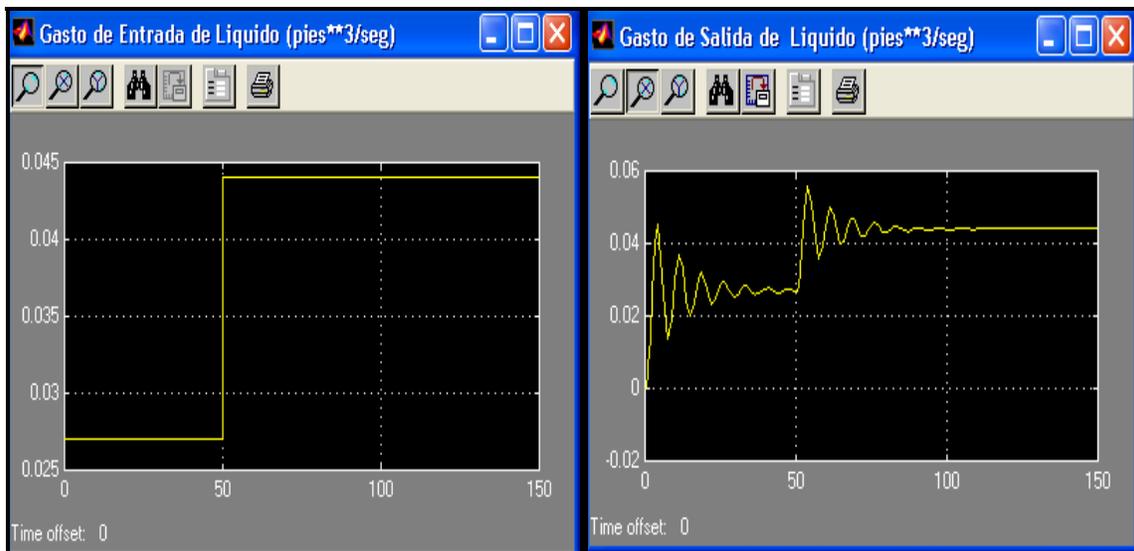


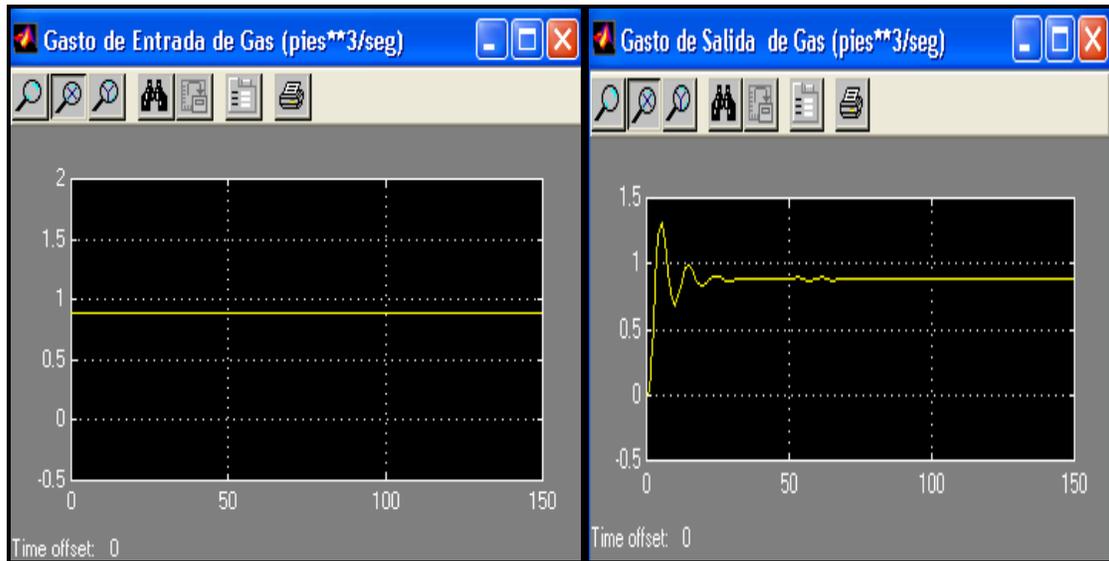
Fig. 5.4 Simulador Construido en Matlab. Validación del Modelo.

En la figura 5.5 se muestran las gráficas de entrada y salida del gasto de líquido generado por el simulador. La simulación en Matlab solo se llevo a cabo en los primeros 150 segundos, esto se debió a que la entrada al sistema es una función de paso. El simulador solo permite un único aumento o disminución de gasto en el sistema, lo cual impidió una vez después de haber aumentado la velocidad a 0.82 pies/seg disminuirla a 0.28 pies/seg, como se observa en la figura 5.3. De esta manera se simuló una entrada de gasto de líquido al sistema de 0.027 pies<sup>3</sup>/seg durante los primeros 50 segundos y después se aumentó a 0.044 pies<sup>3</sup>/seg hasta 150 segundos. También se observa la salida del gasto de líquido, en donde es importante destacar que el gasto llega a sus valores iniciales de entrada después de tener varias fluctuaciones.



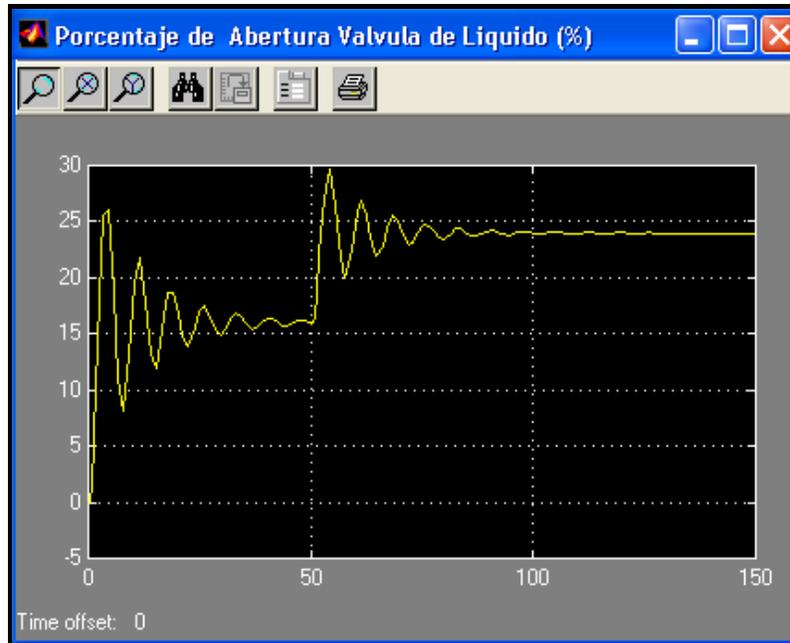
**Fig. 5.5. Gastos de entrada y salida de líquido. Validación del Modelo.**

En la figura 5.6 se observa la entrada y salida de gasto de gas del sistema. Igual que en el experimento, el gasto de gas fue constante en todo el tiempo de simulación con un valor de 0.882 pies<sup>3</sup>/seg.



**Fig. 5.6. Gastos de entrada y salida de gas. Validación del Modelo.**

En la figura 5.7 se muestra el porcentaje de apertura de la válvula de líquido. Durante los primeros 50 segundos la válvula tiene un promedio de apertura arriba del 15%, lo que realmente representa un 65%, ya que el modelo fue realizado para que inicialmente la válvula estuviera 50% abierta. Una vez aumentado el gasto de líquido la válvula se abre un poco más presentando un promedio de apertura de alrededor del 75%, esto corresponde en el tiempo de simulación de 50 a 150 segundos. En comparación con la gráfica del experimento, los resultados generados por el modelo presentan menos fluctuaciones y tienden a estabilizarse rápidamente en una apertura constante dependiendo del gasto del sistema. Sin embargo, los valores promedios de apertura a lo largo de toda la simulación son muy parecidos indicando una buena concordancia y tendencias similares entre las predicciones del modelo y los datos experimentales medidos en la válvula de control de líquido del separador CCGL. De esta manera se puede decir que existe una buena concordancia cualitativa entre las dos gráficas y mas aún que los valores del modelo representan de muy buena manera los datos experimentales.



**Fig. 5.7. Porcentaje de abertura de la válvula de líquido. Validación del Modelo.**

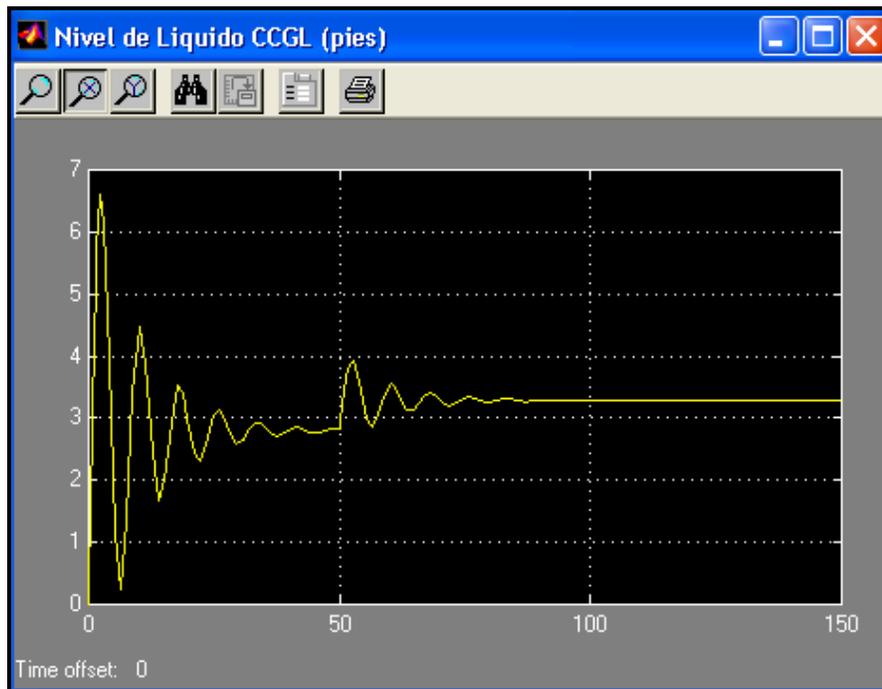
Aunque en el experimento no se tomaron datos del comportamiento de la válvula de gas, en la figura 5.8 se presenta el porcentaje de abertura de esta válvula predecida por el modelo. Se tiene un promedio de abertura entre 51.5 y 52%. No presenta muchas fluctuaciones y prácticamente su abertura es muy pequeña debido a que el gasto de gas permanece constante.



**Fig. 5.8. Porcentaje de abertura de la válvula de gas. Validación del Modelo.**

---

La figura 5.9 muestra el nivel de líquido predicho por el modelo. Es importante notar que en los primeros segundos de simulación el nivel de líquido fluctúa considerablemente entre valores picos de arriba de los 6 pies y los 0 pies, hasta estabilizarse en el punto de ajuste de más o menos 2.9 pies en los primeros 50 segundos. Esta discrepancia entre el modelo y los datos experimentales se debe a que en el experimento se tomaron los datos cuando el sistema se encontraba estabilizado, en cambio el modelo simula como si estuviera arrancando el sistema. Después de los primeros 50 segundos el nivel de líquido presenta un pico de 4 pies y se estabiliza en un valor promedio de 3.1 pies aproximadamente, lo que representa un aumento de nivel de líquido debido al aumento del gasto de líquido o entrada de un bache al sistema. De nuevo se tienen tendencias muy parecidas y valores aproximados entre la predicción del modelo y los valores experimentales. En general, los valores promedios del nivel de líquido concuerdan muy bien con los datos medidos en el separador CCGL y se puede decir que existe una buena concordancia cualitativa de tendencias en lugar de cuantitativa punto a punto.



**Fig. 5.9. Nivel de Líquido. Validación del Modelo.**



---

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES DE LAS SIMULACIONES DINAMICAS

En este capítulo se presentan los resultados y discusiones de las simulaciones dinámicas de los modelos matemáticos propuestos en el capítulo 4 mediante el uso del software comercial Matlab/Simulink. De esta manera, el sistema de separación considerado en este estudio consiste de un separador ciclónico cilíndrico gas-líquido de 10 pies de altura y 0.25 pies de diámetro. Se asume que el recipiente posee un controlador de presión y una válvula de control en la línea de descarga del gas y un controlador de líquido con una válvula de control en la línea de salida del líquido. Las variables controladas son la presión y el nivel de líquido en el recipiente.

Se asume un flujo bache idealizado para entrar al recipiente, representado por una entrada de paso. Lo cual significa que la entrada tiene un valor constante para todos los tiempos excepto en el tiempo de salto. La entrada representa el peor de los casos que el sistema esta expuesto a manejar. En este estudio, dos entradas de paso han sido utilizadas: una para el gasto de flujo instantáneo de líquido y otra para el gasto de flujo instantáneo de gas.

En la Tabla 4.1 (Ver Capítulo 4) se presentan las diferentes combinaciones de las estrategias de control que se van a simular para evaluar el comportamiento global del funcionamiento del separador CCGL. A continuación se puede observar una tabla con la información general de los datos de entrada al simulador, tanto para el sistema de control de líquido como el del gas. Esta información representa las características de producción del sistema, las dimensiones y parámetros de ajustes del separador y las características de las válvulas de control que se pretenden simular.

Tabla 6.1 Datos de entrada al Simulador. Ejemplo Propuesto.

| Nomenclatura  | Significado  | Valor                           |
|---|--|---------------------------------|
| $d_{CCGL}$  | Diámetro del CCGL  | 0.25 pies                       |
| $H_{CCGL}$  | Altura total del CCGL  | 10 pies                         |
| $Q_l$   | Gasto de entrada de Líquido  | 0.1-0.15 pies <sup>3</sup> /seg |
| $P_{CCGL\_ajuste}$  | Presión de Ajuste  | 19 psig                         |
| $P_L$   | Presión de descarga de Líquido   | 15 psig                         |
| $P_{CCGLmax}$   | Presión Máxima   | 21 psig                         |
| $P_{CCGLmin}$   | Presión Mínima   | 17 psig                         |
| $\gamma_L$  | Gravedad específica del Líquido  | 0.98                            |
| $H_{CCGLmax}$   | Nivel Máximo CCGL  | 5 pies                          |
| $H_{CCGL\_ajuste}$  | Nivel de Ajuste CCGL   | 2 pies                          |
| $H_{CCGLmin}$   | Nivel Mínimo CCGL  | 1 pies                          |
| $\left(\frac{dC_{vL}}{d\chi_L}\right) = \left(\frac{dC_{vG}}{d\chi_G}\right)$ | Característica de la Válvula de Control del cambio del coeficiente de flujo con el cambio del porcentaje de abertura | 0.5                             |
| $C_{oL}=C_{oG}$   | Parámetro de la Válvula de Control relacionado al tiempo de respuesta de la Válvula                                  | 2 seg                           |
| $C_{vL}=C_{vG}$   | Coficiente de Flujo de la Válvula de Control para 50% de abertura  | 28                              |
| $\tau_{oL} = \tau_{oG}$   | Ctte. de tiempo de la Línea Neumática de Transmisión   | 0.4 seg                         |
| $Q_G$   | Gasto de entrada de Gas  | 0.2-0.35 pies <sup>3</sup> /seg |
| $\gamma_G$  | Gravedad específica del Gas  | 0.81                            |
| $M_G$   | Masa Molecular del Gas   | 20 lb/lb-mol                    |
| $Z$   | Factor de Compresibilidad del Gas  | 0.90                            |
| $Y$   | Factor de Expansión  | 0.80                            |
| $N_7$   | Constante Numérica   | 0.37                            |
| $T$   | Temperatura de Operación   | 80 F                            |
| $F_p$   | Factor Geométrico de la Tubería  | 1                               |
| $x$   | Caída de Presión ( $P_{CCGL\_ajuste} - P_L$ )  | 4                               |

De esta manera se pueden calcular las constantes o ganancias del diagrama general de bloque mostrado en la figura 4.20 (Ver Capítulo 4).

**Tabla 6.2. Cálculo de las Ganancias. Ejemplo Propuesto.**

| Bloque | Relación                                 | Valor |
|--------|--|-------|
| 5      | $R_1$                                    | 0.045 |
| 7      | $\frac{4}{\pi d^2}$                      | 20.37 |
| 8      | $\frac{12}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}}$ | 3     |
| 13     | $R_2$                                    | 0.34  |
| 15     | $R_3$                                    | 10.94 |
| 16     | $\frac{12}{P_{CCGL\max} - P_{CCGL\min}}$ | 3     |

Lo último que faltaría por definir son las ganancias de los controladores y los correspondientes tiempos integrales y derivativos, los cuales van a ser fijados con los valores dados en la tabla 6.3.

**Tabla 6.3. Ganancias de los Controladores. Ejemplo Propuesto.**

| Controlador de Nivel de Líquido | Controlador de Presión de Gas |
|---------------------------------|-------------------------------|
| $K_{cL} = 0.53$                 | $K_{cG} = 0.203$              |
| $T_{iL} = 0.11$                 | $T_{iG} = 0.014$              |
| $T_{dL} = 0.59$                 | $T_{dG} = 0.676$              |

Donde  $K_{cL}$  y  $K_{cG}$  representan las ganancias de los controladores,  $T_{iL}$  y  $T_{iG}$  los tiempos de integración y por último  $T_{dL}$  y  $T_{dG}$  representan los tiempos derivativos de los controladores de líquido y gas respectivamente. En la figura 6.1 se muestra el simulador construido en Matlab/Simulink.

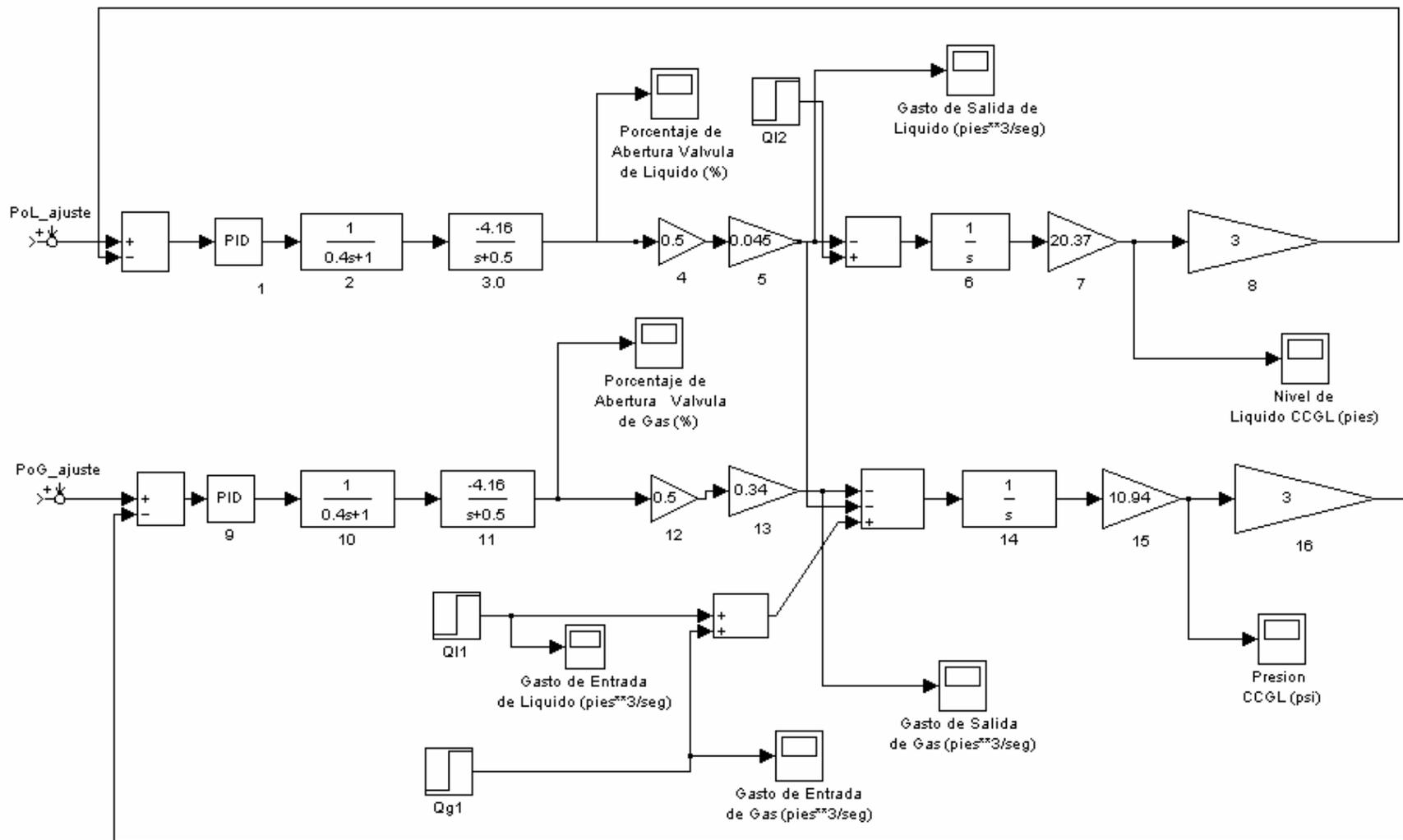


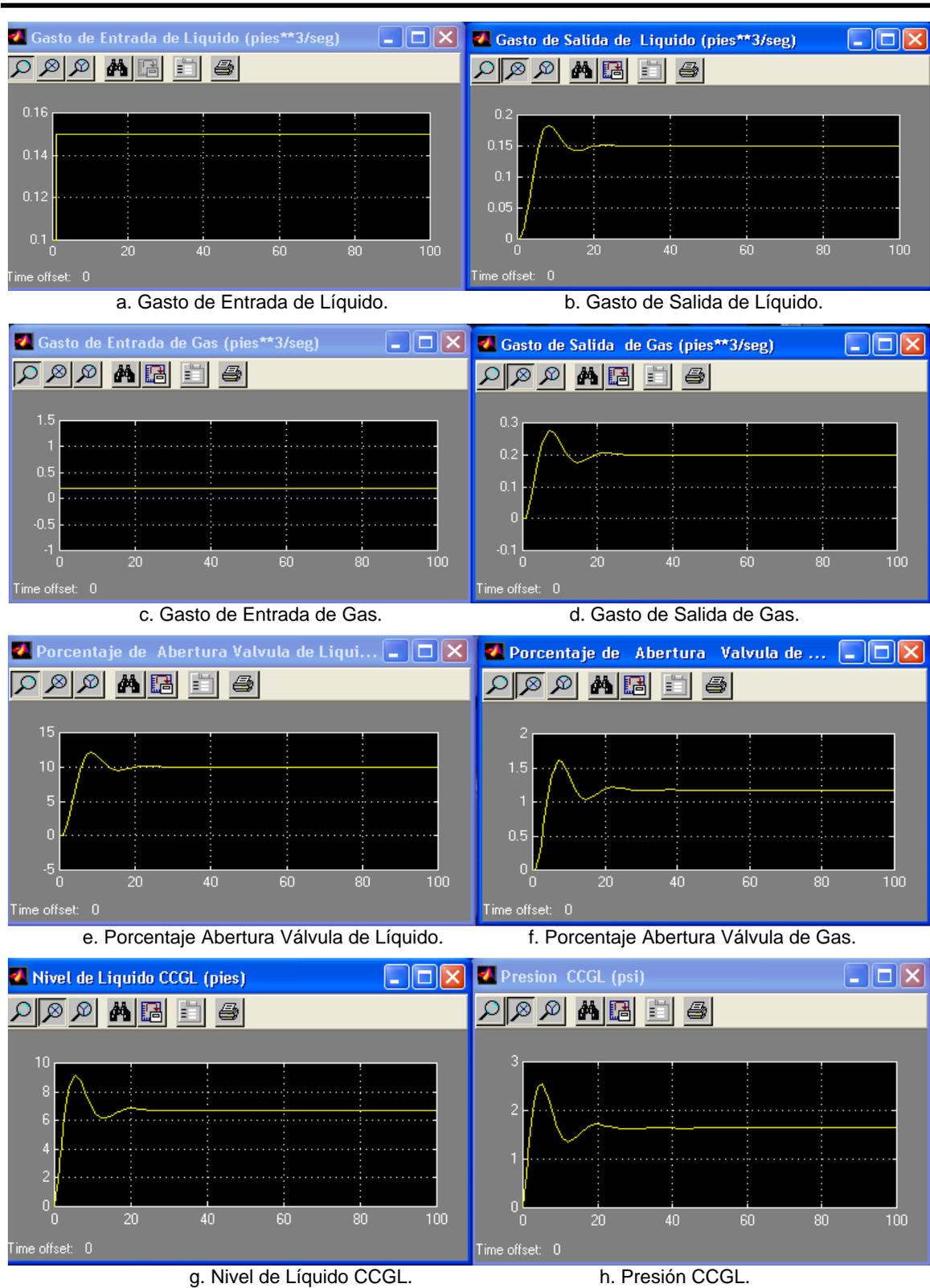
Fig. 6.1. Simulador Construido en Matlab/Simulink. Ejemplo Propuesto.

---

## 6.1. CASO 1 (PROPORCIONAL---PROPORCIONAL)

Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL ante una entrada tipo escalón, con un incremento del gasto de líquido en un 50% (de 0.1 a 0.15 pies<sup>3</sup>/seg) y manteniendo el gasto de gas constante (0.2 pies<sup>3</sup>/seg). Ver figura 6.2 (a-c). La prueba esta diseñada para simular el arribo de un bache de líquido al sistema de producción y observar el comportamiento del sistema de control en el separador con los controladores proporcionales instalados en las líneas de líquido y gas. En general la figura 6.2 representa las entradas al sistema y las respuestas dinámicas del mismo. Las figuras b y d muestran el comportamiento de la salida del gasto de líquido y gas, las figuras e y f representan el porcentaje de abertura de las válvulas de líquido y gas y por último se tienen las figuras más importantes (g-h) en donde se observa tanto las fluctuaciones del nivel de líquido en el separador como la presión del mismo.

Se puede observar que tanto el gasto de salida de gas y de líquido alcanzan sus valores iniciales después de un intervalo de tiempo. La válvula de control de líquido cambia desde su punto de ajuste (abierta 50%) hasta un máximo de 12% en los primeros 10 segundos, lo cual significa una abertura real de 62%, lográndose estabilizar en una abertura de 60% de tal manera de permitir que el exceso de líquido salga del separador. La válvula de gas también se abre pero un porcentaje mucho menor que la de líquido. También es importante destacar que tanto el nivel de líquido como la presión en el separador no regresan a sus valores de ajuste, este comportamiento es típico de un controlador proporcional, en donde un cambio en la entrada del sistema hace que el valor controlado este abajo o arriba del punto de ajuste. Este error en la variable controlada es llamado "offset" o desviación estable. Finalmente se puede notar que el incremento de un 50% en la entrada de líquido hace que el nivel de líquido en el separador alcance un valor pico de 9 pies. La altura total del separador CCGL es de 10 pies, indicando que el separador casi se inunda.



**Fig. 6.2. Caso 1. (Proporcional---Proporcional). Incremento del Gasto de Líquido.**

---

## 6.2. CASO 2 (PROPORCIONAL-INTEGRAL---PROPORCIONAL)

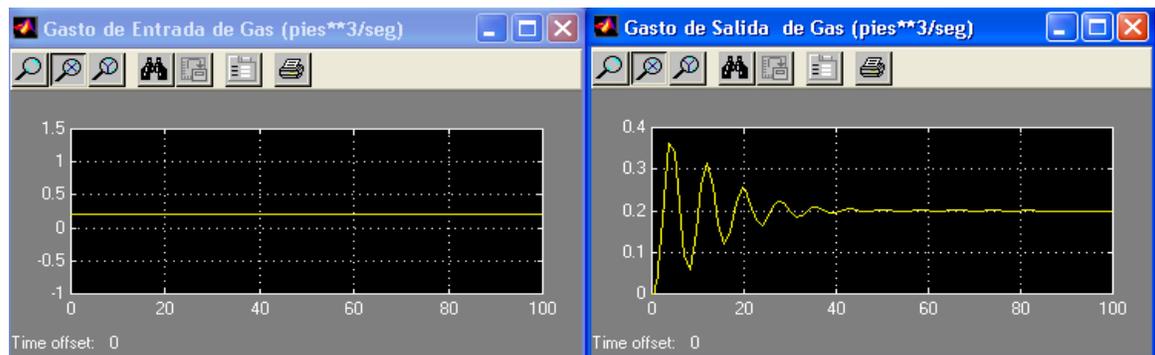
Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL bajo la condición de una entrada tipo escalón, incrementando el gasto de líquido en un 50% y manteniendo el gasto de gas constante. El sistema de control incorpora un controlador Proporcional para la presión de gas y un controlador Proporcional-Integral para el nivel de líquido. La figura 6.3 ilustra las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo. Tanto el gasto de líquido como el gasto de gas alcanzan sus valores iniciales después de fluctuar por un período de tiempo.

Al agregar la acción integral a la proporcional se elimina el “offset” o desviación estable en el nivel de líquido controlado, pero se incrementa el tiempo de estabilización, esto es típico de la respuesta de un controlador Proporcional-Integral. En general su efecto se traduce en disminuir apreciablemente el error en estado estacionario a costa de una desmejora de la parte transitoria de la respuesta del sistema controlado. Como se puede observar el nivel de líquido alcanza un pico de 4.5 pies hasta que después de 40 segundos se estabiliza en 2 pies. El comportamiento de la presión es similar al caso anterior, en donde alcanza un valor pico y no regresa al punto de ajuste. La válvula de líquido se abre hasta un máximo de 65% y fluctúa durante 40 segundos hasta que se estabiliza en 60% dejando que el exceso de líquido salga del separador. Finalmente se puede notar en la figura 6.3 que la constante integral de tiempo usada para el controlador Proporcional-Integral hace que el sistema fluctúe considerablemente pudiendo llevarlo a una respuesta inestable. Reduciendo el tamaño de esta constante de tiempo puede producir una respuesta más suavizada pero con un tiempo de respuesta mucho más lento.



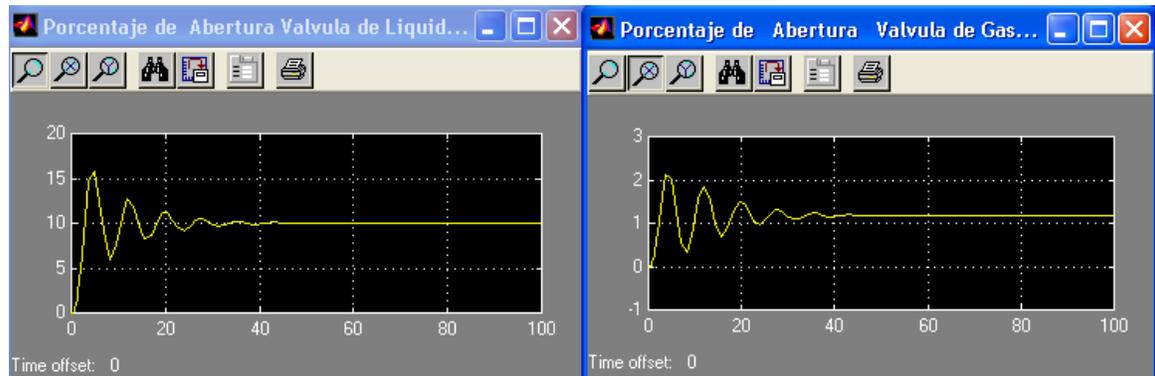
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



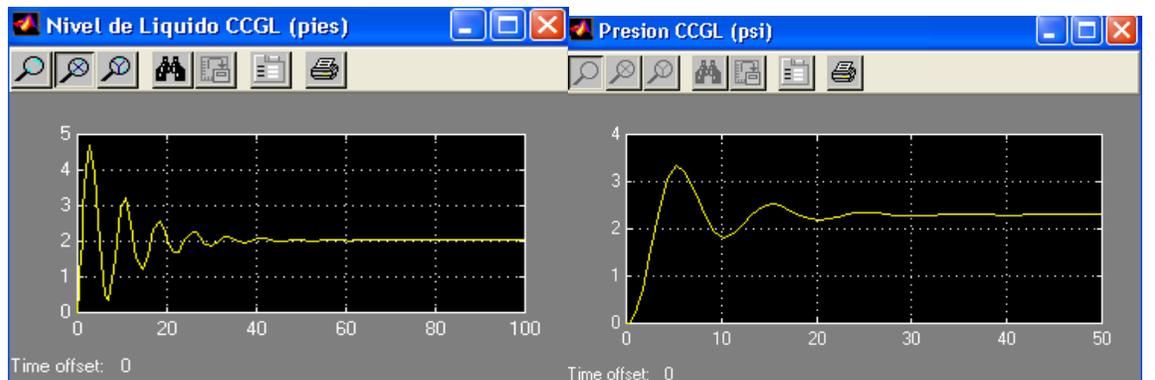
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

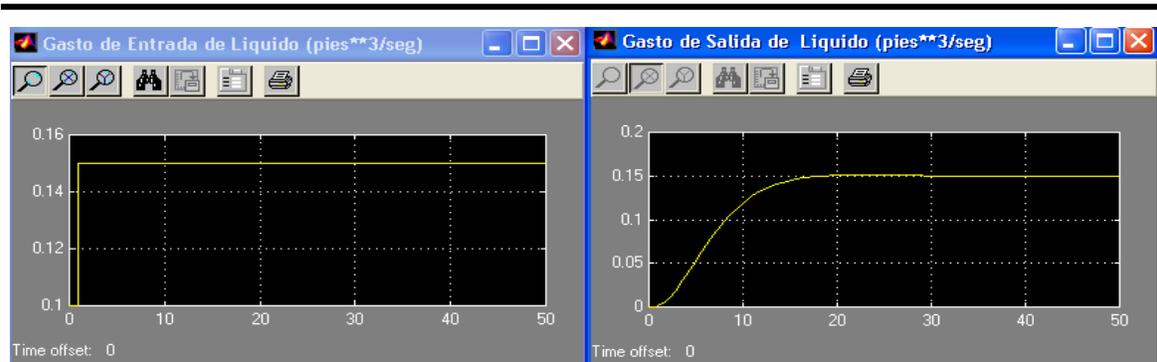
**Fig. 6.3. Caso 2. (Proporcional-Integral---Proporcional). Incremento del Gasto de Líquido.**

---

### 6.3. CASO 3 (PROPORCIONAL-DERIVATIVO---PROPORCIONAL)

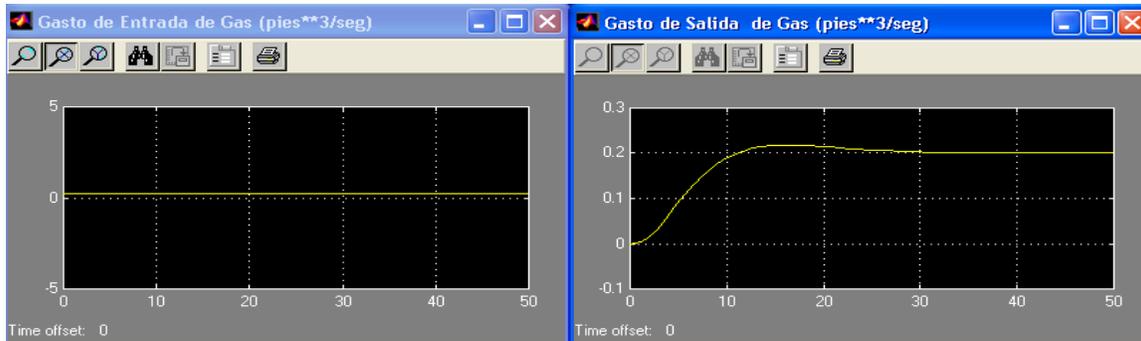
Este caso muestra el comportamiento de un separador CCGL bajo la condición de una entrada tipo escalón, incrementando el gasto de líquido en un 50%, para simular una entrada de flujo bache al sistema de producción y manteniendo el gasto de gas constante. El sistema de control lo integra un controlador Proporcional-Derivativo para el nivel de líquido y un controlador Proporcional para la presión del gas. El objetivo de usar el controlador Proporcional-Derivativo es disminuir el tiempo de respuesta del sistema, aunque este tipo de controlador no elimina la desviación estable de la variable controlada. En la figura 6.4 se observan las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo. Tanto los gastos de gas y líquido alcanzan sus valores iniciales, notándose que el sistema alcanza la estabilidad en mucho menos tiempo que el caso 1, lo cual es la ventaja más importante de introducir un controlador Proporcional-Derivativo.

El nivel de líquido alcanza un pico de 8 pies y se estabiliza en 7 pies después de 15 segundos. De esta manera también se observa que el separador no llegó a un nivel de posible inundación, lo cual si ocurrió en el caso 1. De igual forma el nivel de líquido no se estabilizó en su punto de ajuste, lo cual nos señala la desviación estable de la variable controlada del proceso. La válvula de líquido abre hasta un 60% y se estabiliza en 15 segundos dejando que el líquido excedente deje el separador, lo cual representa una mejora de 5 segundos en el tiempo de estabilización del sistema en comparación con el caso 1. Aunque el gasto de gas permanece constante, el aumento del gasto de líquido hace que la válvula de gas se abra un poco y que aumente la presión en el separador.



a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



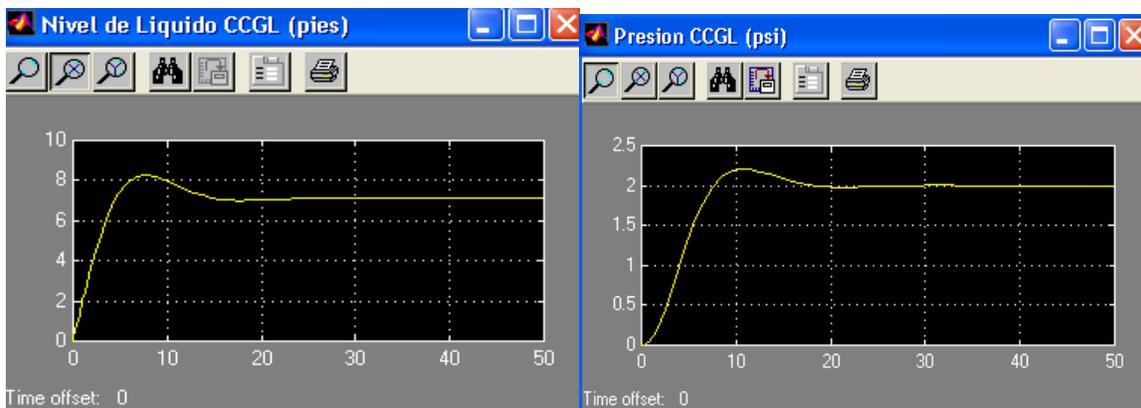
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

**Fig. 6.4. Caso 3. (Proporcional-Derivativo---Proporcional). Incremento del Gasto de Líq.**

---

#### 6.4. CASO 4 (PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO---PROPORCIONAL)

Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL ante una entrada tipo escalón, incrementando el flujo de líquido en un 50% y manteniendo el gasto de gas constante. El sistema de control introduce un controlador Proporcional-Integral-Derivativo para controlar el nivel de líquido y un controlador Proporcional para la presión del gas. El efecto de este tipo de controlador es que tiene la capacidad de adelantar la respuesta del sistema, mejorar la estabilidad y no modificar el estado estacionario y por lo tanto el objetivo principal es tratar de disminuir el tiempo de respuesta del nivel de líquido y eventualmente forzar al sistema a eliminar la desviación estable. La figura 6.5 muestra las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo.

El nivel de líquido llega hasta un máximo de 5 pies, lográndose estabilizar en un poco más de 2 pies en un tiempo mayor a 30 segundos, de esta manera se reduce el tiempo de estabilización de la variable controlada en 10 segundos en comparación con el caso 2. Al igual que el controlador Proporcional-Integral el controlador Proporcional-Integral-Derivativo elimina la desviación estable pero lo hace en un tiempo más rápido. La válvula de líquido abre hasta un máximo de 65% en los primeros 5 segundos, estabilizándose en 60% de abertura permitiendo la salida del excedente de líquido. Debido al incremento de líquido se produce una pequeña abertura de la válvula de gas y la presión en el separador aumenta hasta un máximo de 3 psi. El uso de un controlador Derivativo en adición al controlador Proporcional-Integral reduce el tiempo de respuesta del sistema. Esto se evidencia en la gráfica del gasto de salida de líquido (Fig. 6.5-a), el cual, en 30 segundos alcanzó el gasto de entrada.



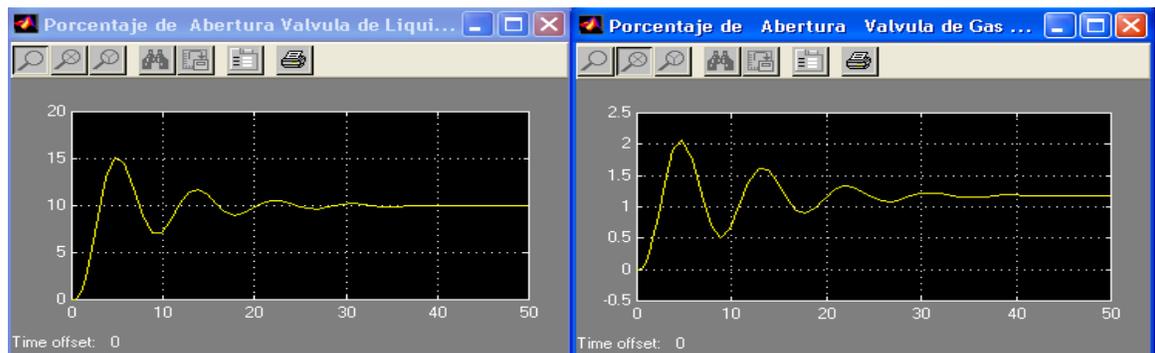
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



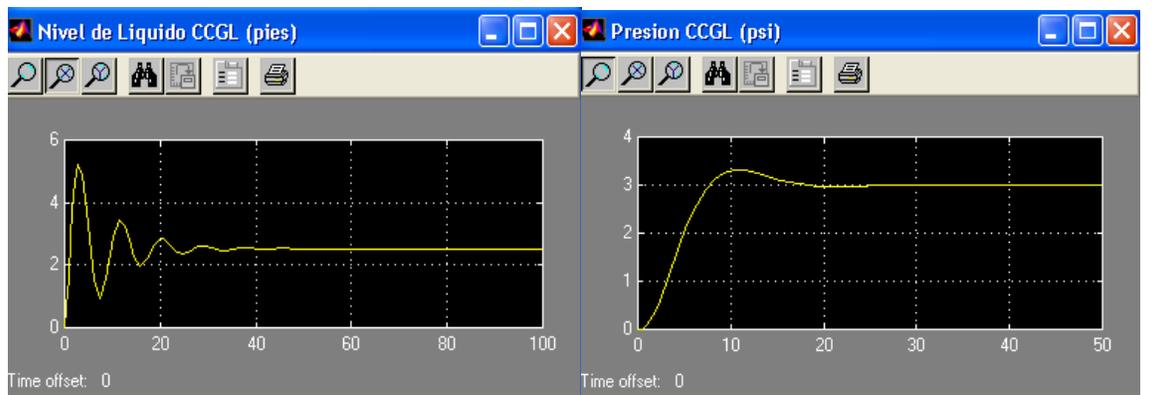
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

**Fig. 6.5. Caso 4. (Proporcional-Integral-Derivativo---Proporcional). Incremento de Liq.**

---

## 6.5. CASO 5 (PROPORCIONAL---PROPORCIONAL-INTEGRAL)

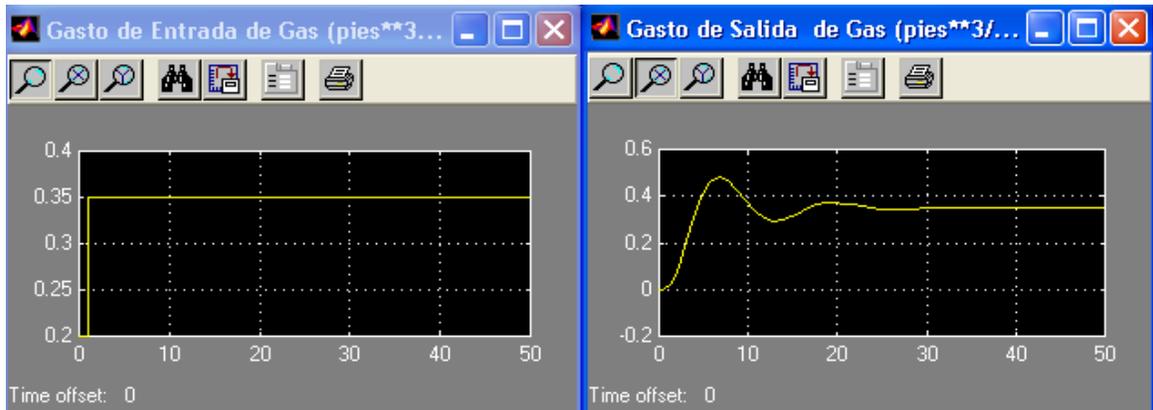
Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL ante una entrada tipo escalón, con un incremento del gasto de gas en un 75% (de 0.2 a 0.35 pies<sup>3</sup>/seg) y manteniendo el gasto de líquido constante (0.1 pies<sup>3</sup>/seg). Ver figura 6.6 (a-c). La prueba esta diseñada para simular el arribo de un bache de gas al sistema de producción y observar el comportamiento del sistema de control en el separador con un controlador Proporcional para el nivel de líquido y un controlador Proporcional-Integral para la presión del gas. En general, la figura 6.6 representa las entradas al sistema y las respuestas dinámicas del mismo.

Se observa que la válvula de líquido se cierra desde su punto de ajuste (50% abierta) a un valor aproximado de 43%, esto se debe al incremento de presión que ocurre en el separador debido a la entrada del bache de gas. En cambio la válvula de gas se abre hasta alcanzar un pico de más del 75% de abertura en los primeros 5 segundos, estabilizándose alrededor del 70% permitiendo que el excedente de gas salga del separador. El nivel de líquido en el separador no se incrementa demasiado debido a que la entrada de líquido permanece constante, teniendo un pico de más de 3 pies en los segundos iniciales estabilizándose en un valor arriba de 1 pie a partir de los 40 segundos de simulación aproximadamente. Es muy importante destacar el aumento considerable de presión que sufrió el sistema, en donde la presión máxima alcanzó un valor arriba de los 6 psi, llegando a estabilizarse después de 20 segundos en un valor cercano a la presión de ajuste del sistema de 4 psi. Esto es resultado de la acción del controlador Proporcional-Integral que controla la presión, el cual tiene la capacidad de llevar al sistema después de un intervalo de tiempo a sus condiciones de ajuste.



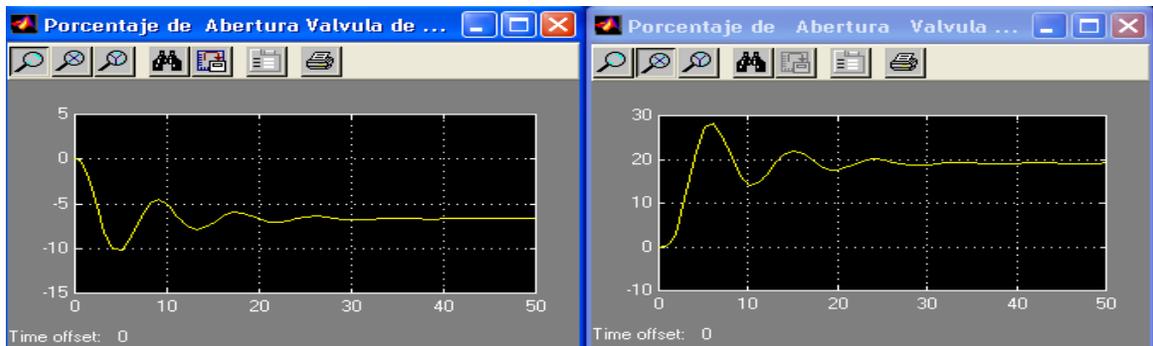
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



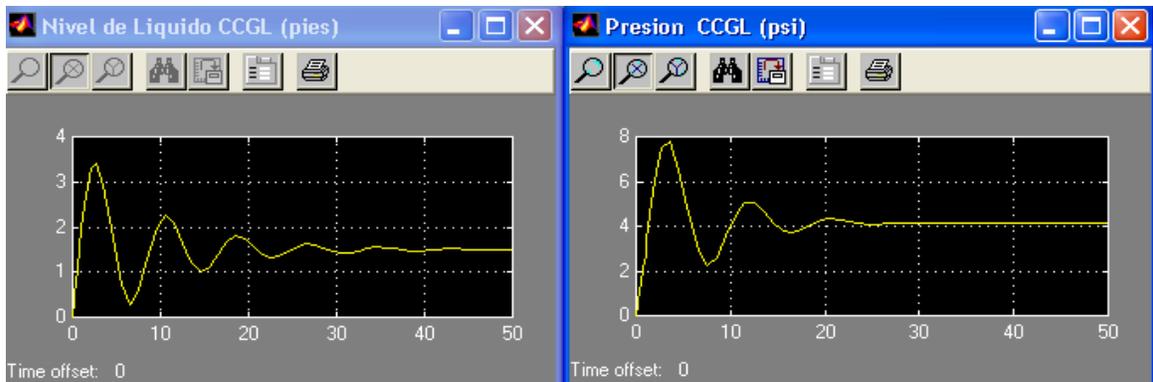
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

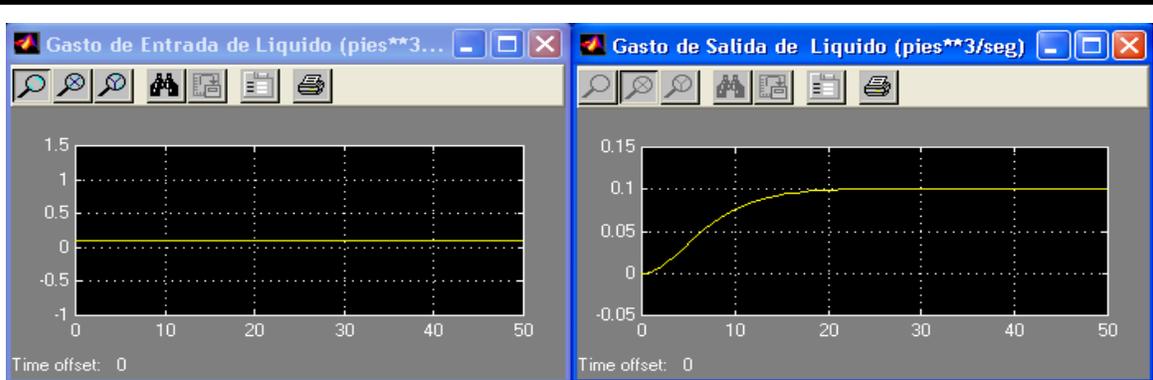
**Fig. 6.6. Caso 5. (Proporcional--Proporcional-Integral). Incremento de Gas.**

---

## 6.6. CASO 6 (PROPORCIONAL---PROPORCIONAL-DERIVATIVO)

Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL bajo la condición de una entrada tipo escalón, incrementando el gasto de gas en un 75% y manteniendo el gasto de líquido constante. El sistema de control incorpora un controlador Proporcional-Derivativo para la presión de gas y un controlador Proporcional para el nivel de líquido. La figura 6.7 ilustra las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo. Tanto el gasto de líquido como el gasto de gas alcanzan sus valores iniciales después de un período de tiempo.

La acción del controlador Proporcional-Derivativo hace que la respuesta del sistema sea un poco más rápida en comparación con al caso anterior. De igual forma se produce una abertura de la válvula de gas hasta un máximo cercano al 90%, quedando abierta con una abertura mayor al 70%, permitiendo que se libere el exceso de gas en el separador. La válvula de líquido se cierra un poco debido al aumento de presión en el recipiente. La presión alcanza un valor pico de 6 psi y no retorna a su valor de ajuste después de la perturbación en el sistema causado por el incremento o cambio en el gasto de gas, esto es resultado de la acción del controlador Proporcional-Derivativo. El nivel de líquido alcanza un valor de 2 pies durante los primeros segundos, estabilizándose en un nivel arriba de 1.5 pies.



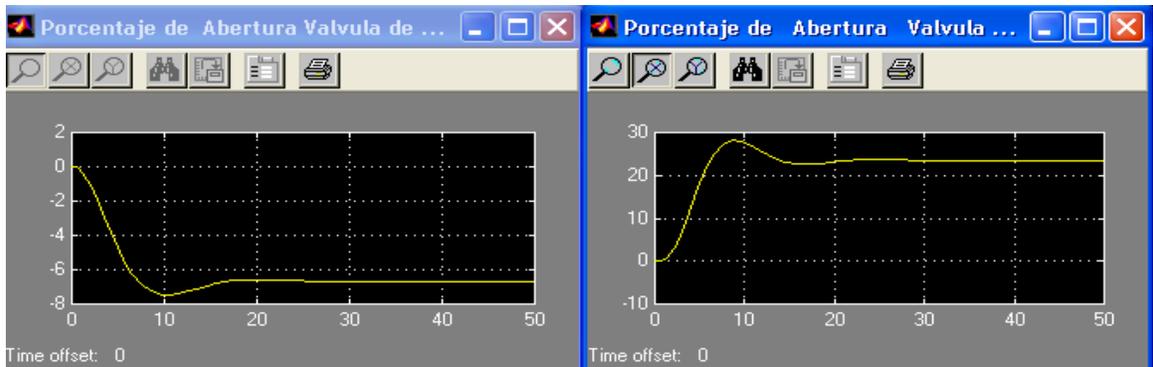
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



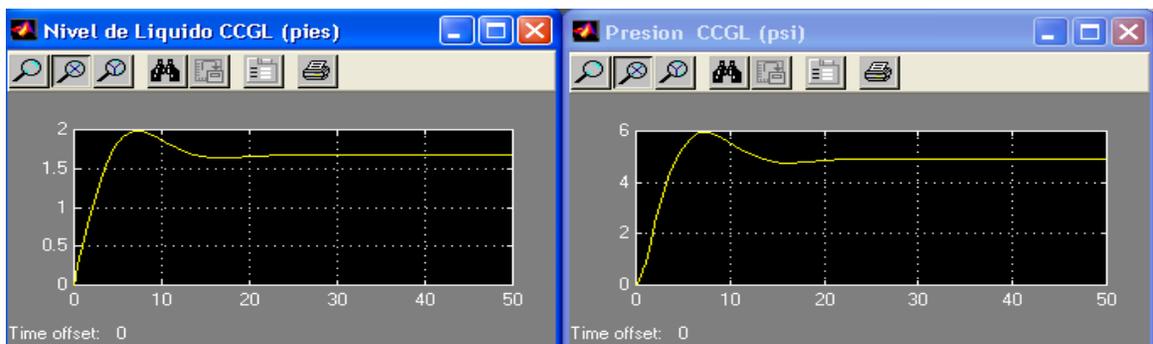
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

**Fig. 6.7. Caso 6. (Proporcional--Proporcional-Derivativo). Incremento de Gas.**

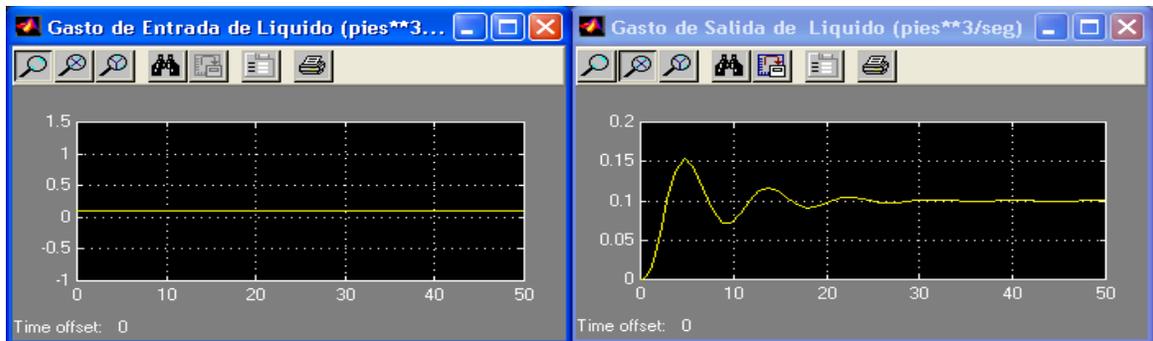
---

## 6.7. CASO 7 (PROPORCIONAL---PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO)

Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL ante una entrada tipo escalón, incrementando el flujo de gas en un 75% y manteniendo el gasto de líquido constante. El sistema de control introduce un controlador Proporcional-Integral-Derivativo para controlar la presión y un controlador Proporcional para el nivel de líquido. El efecto de este tipo de controlador es que tiene la capacidad de adelantar la respuesta del sistema y mejorar la estabilidad. La figura 6.8 muestra las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo.

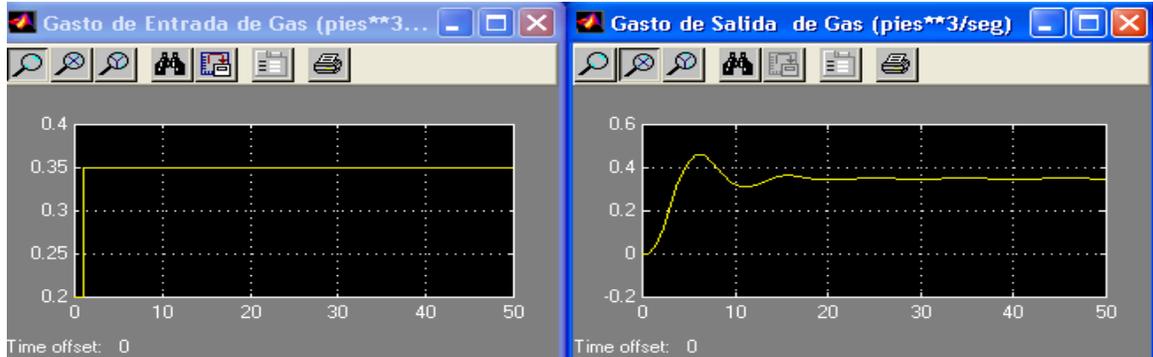
Se observa que el gasto de salida de gas alcanza su valor de entrada en un tiempo menor que en el caso donde se tenía instalado un controlador Proporcional-Integral disminuyendo el tiempo de estabilización en 15 segundos aproximadamente. La válvula de gas se abre hasta un máximo arriba del 90%, estabilizándose en una abertura de un 80%, permitiendo que el exceso de gas libere el separador. La presión fluctúa en un tiempo de 20 segundos pero llega a su punto de ajuste de 4 psi, como resultado de la acción del controlador Proporcional-Integral-Derivativo. La altura de líquido no alcanza su punto de ajuste debido a la desviación estable ocasionado por el controlador Proporcional.

La acción derivativa añadido al control Proporcional-Integral incrementa la estabilidad en el sistema y también acelera que la desviación estable o el error de la presión tienda a cero. La válvula de líquido se cierra hasta un 40% en los primeros 5 segundos, después se abre un poco estabilizándose en una abertura del 44%, abajo del punto de ajuste (50% abierta).



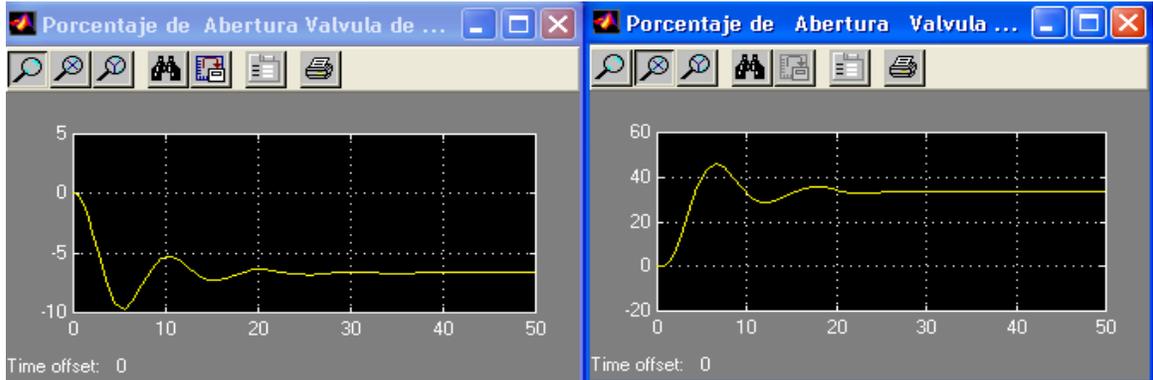
a. Gasto de Entrada de Liquido.

b. Gasto de Salida de Liquido.



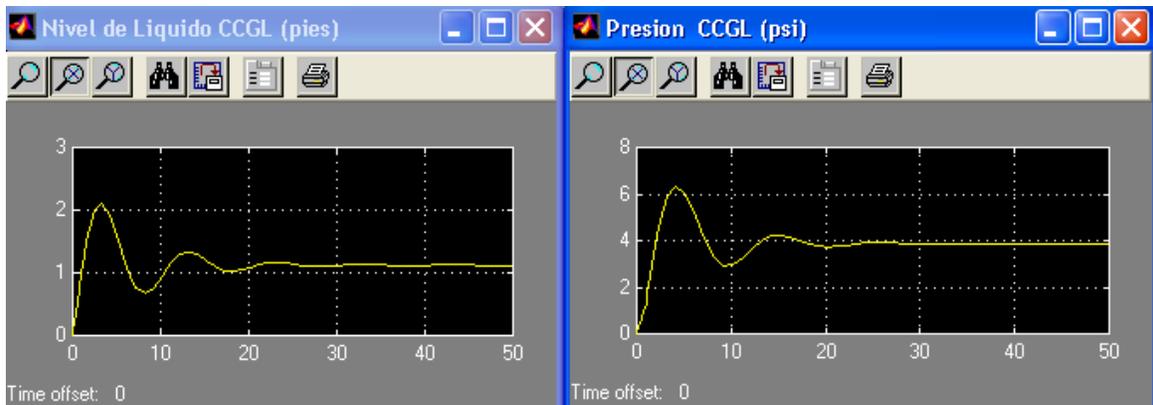
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Liquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

**Fig. 6.8. Caso 7. (Proporcional--Proporcional-Integral-Derivativo). Incremento de Gas.**

---

## 6.8. CASO 8 (PROPORCIONAL-INTEGRAL---PROPORCIONAL-DERIVATIVO)

Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL bajo la condición de una entrada tipo escalón, incrementando el gasto de líquido en un 50% y manteniendo el gasto de gas constante. El sistema de control incorpora un controlador Proporcional-Derivativo para la presión de gas y un controlador Proporcional-Integral para el nivel de líquido. La figura 6.9 ilustra las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo.

Este caso es muy similar al 2, considerando el cambio del controlador para la presión del gas, en donde se añadió la acción derivativa al controlador Proporcional. El objetivo de esta variante es el disminuir el tiempo de estabilización del lazo de control del gas. Se observa que el gasto de gas se estabiliza aproximadamente 10 segundos antes en comparación con al caso 2, llegando igual a su valor inicial de entrada. La curva de abertura de la válvula de gas se suaviza considerablemente y alcanza un valor pico, arriba del 51.5%, estabilizándose en una pequeña abertura de 51%. Igualmente que en el caso 2 la válvula de líquido se abre dejando que el excedente de líquido salga del separador, presentando un comportamiento muy parecido, pero fluctuando mucho menos.

Es importante destacar la diferencia observada en la curva de presión del gas, en donde, en el caso 2 se observan mayores fluctuaciones y más valores picos que en el caso de estudio. En general mediante la acción derivativa se logra bajar el tiempo de estabilización del sistema en más de 15 segundos, aun cuando esta acción no elimina por completo la variación estable de la variable controlada, ya que la presión no regresa a su valor de ajuste de 4 psi.



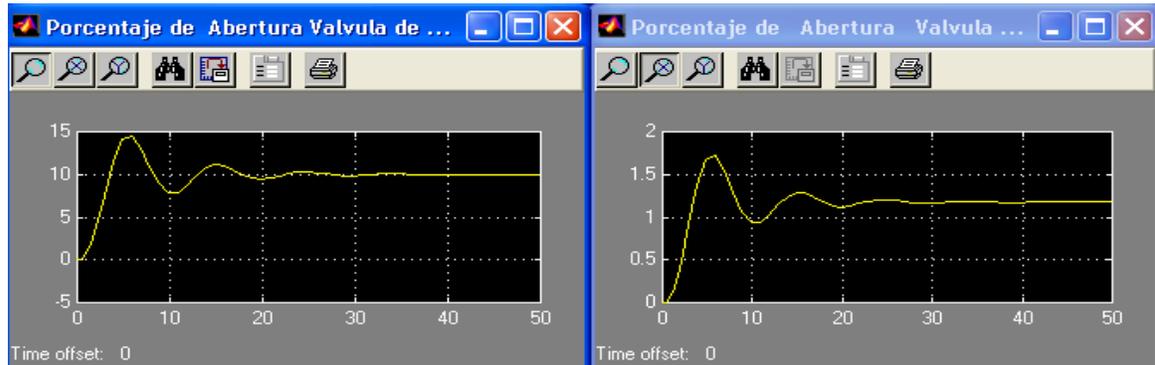
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



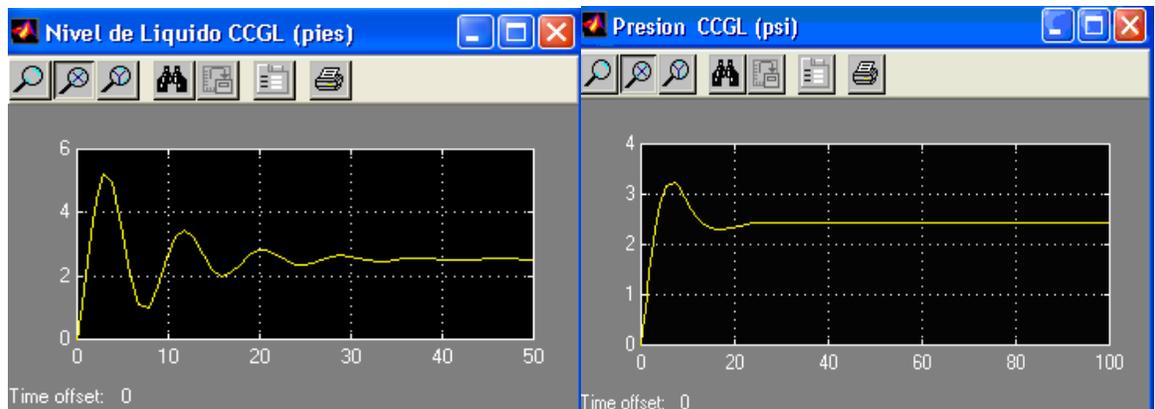
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

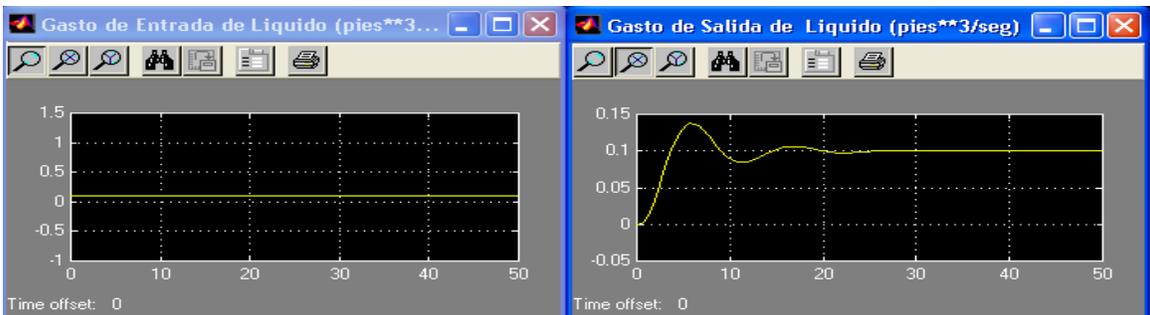
**Fig. 6.9. Caso 8. (Proporcional-Integral---Proporcional-Derivativo). Incremento de Liq.**

---

## 6.9. CASO 9 (PROPORCIONAL-DERIVATIVO---PROPORCIONAL-INTEGRAL)

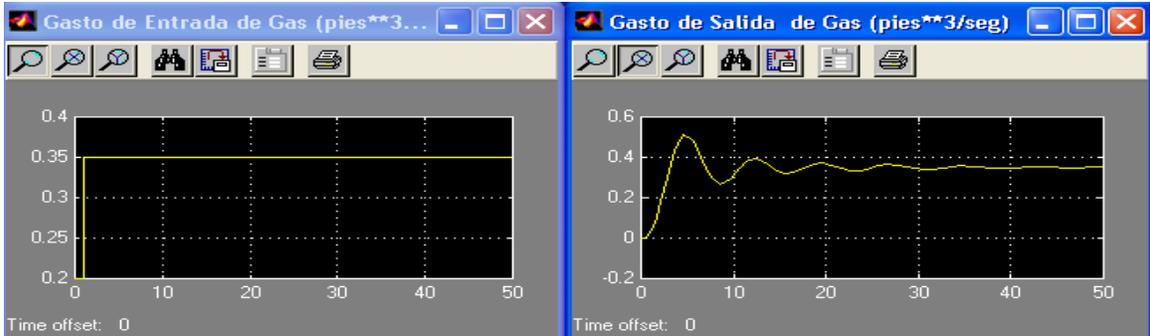
Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL ante una entrada tipo escalón, con un incremento del gasto de gas en un 75% (de 0.2 a 0.35 pies<sup>3</sup>/seg) y manteniendo el gasto de líquido constante (0.1 pies<sup>3</sup>/seg). La prueba esta diseñada para simular el arribo de un bache de gas al sistema de producción y observar el comportamiento del sistema de control en el separador con un controlador Proporcional-Derivativo para el nivel de líquido y un controlador Proporcional-Integral para la presión del gas. En general, la figura 6.10 representa las entradas al sistema y las respuestas dinámicas del mismo.

Este caso es muy similar al caso 5, considerando el cambio del controlador para el nivel de líquido, en donde se añadió la acción derivativa al controlador Proporcional. El objetivo de esta variante es el disminuir el tiempo de estabilización del lazo de control del líquido. El comportamiento global de las gráficas es muy parecido a las mostradas en el caso 5, lográndose destacar la disminución del tiempo de estabilización del sistema, lo cual se puede apreciar en el nivel de líquido que se logra estabilizar 10 segundos antes. Igualmente se produce un cierre de la válvula de líquido y una abertura considerable de la válvula de gas. La presión en el separador alcanza un valor pico de más de 6 psi en los primeros segundos, lográndose estabilizar en la presión de ajuste de 4psi después de los 20 segundos.



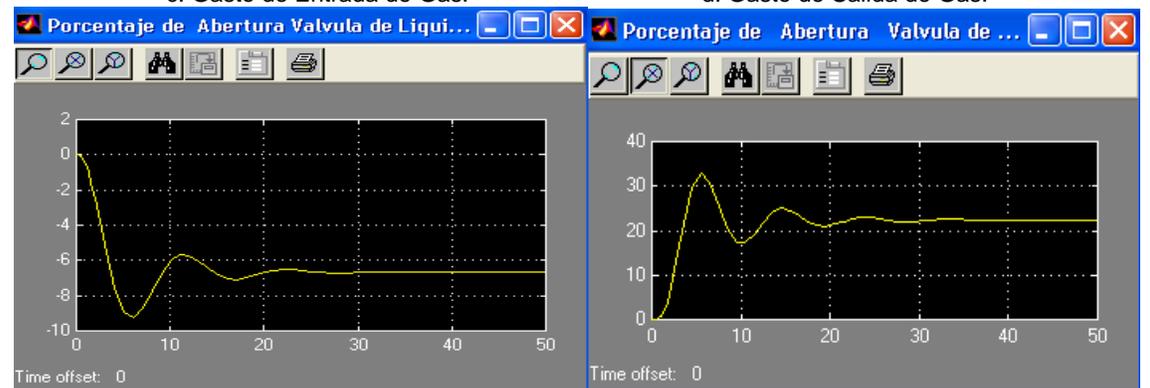
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



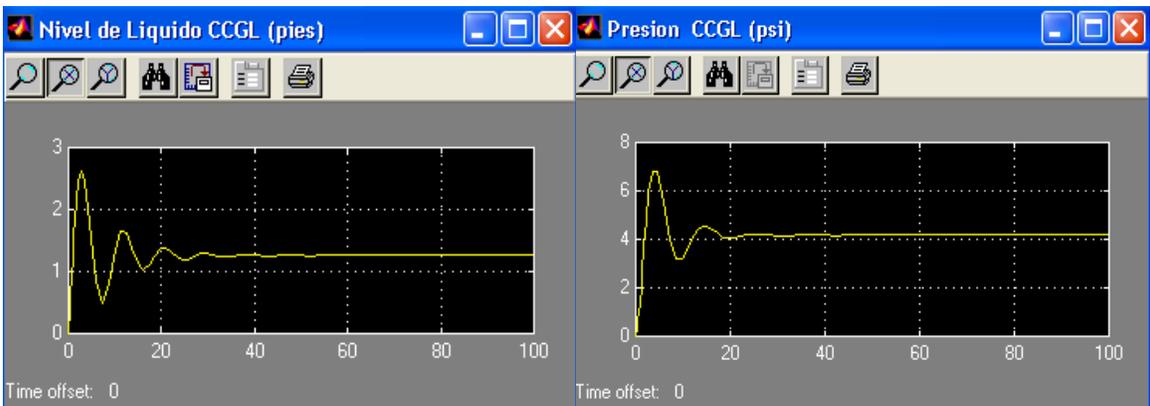
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

**Fig. 6.10. Caso 9. (Proporciona-Derivativo---Proporcional-Integral). Incremento de Gas.**

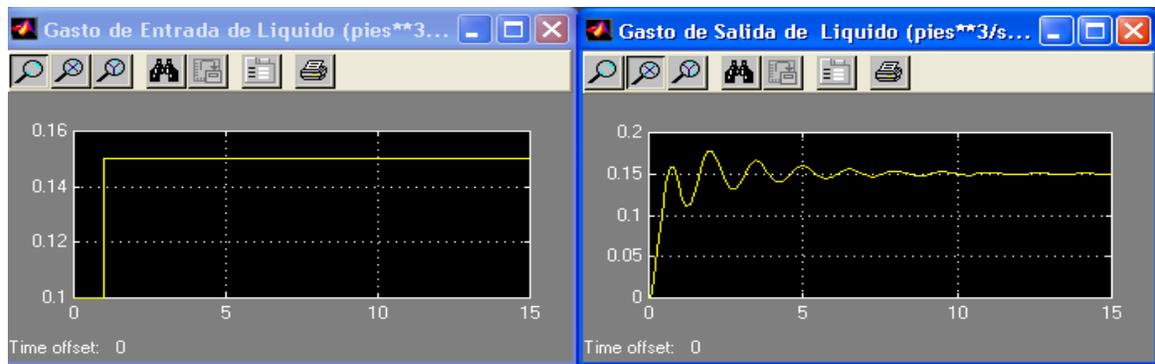
---

## **6.10. CASO 10 (PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO—PROPOR.-INTEGRAL-DERIVATIVO)**

### **6.10.1. INCREMENTO DE GASTO DE LÍQUIDO**

Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL bajo la condición de una entrada tipo escalón, incrementando el gasto de líquido en un 50% y manteniendo el gasto de gas constante. El sistema de control incorpora un controlador Proporcional-Integral-Derivativo tanto para la presión de gas como para el nivel de líquido. La figura 6.11 ilustra las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo.

Como se observa en las figuras tanto el gasto de líquido como el gasto de gas logran retornar a sus valores de entrada en un tiempo no mayor a 10 segundos. El controlador Proporcional-Integral-Derivativo incrementa la estabilidad del sistema y también disminuye el tiempo de respuesta del sistema de control. Debido al incremento del gasto de líquido la válvula de control de líquido se abre hasta llegar a un máximo del 65% lográndose estabilizar en 60% después de 15 segundos, dejando que el excedente de líquido salga del recipiente, esto refleja la disminución de tiempo de estabilización del sistema en comparación con los casos anteriores. Tanto el nivel de líquido como la presión casi logran alcanzar los valores de ajuste en un tiempo muy rápido, como resultado de la acción de los controladores PID. Se puede observar que al incorporar esta estrategia de control en los dos lazos de control se asegura que las dos cantidades retornen a sus puntos de ajuste. En general, esta combinación de controladores ha proporcionado la mejor respuesta del sistema, tanto en tiempo como en valores obtenidos.



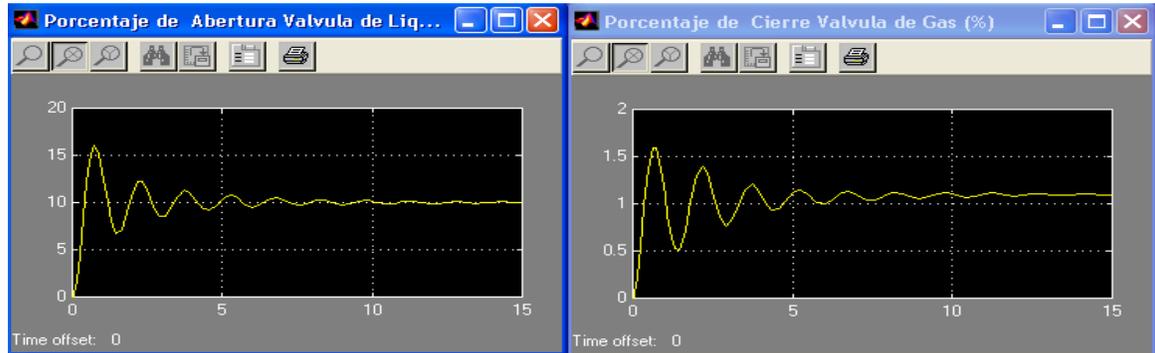
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



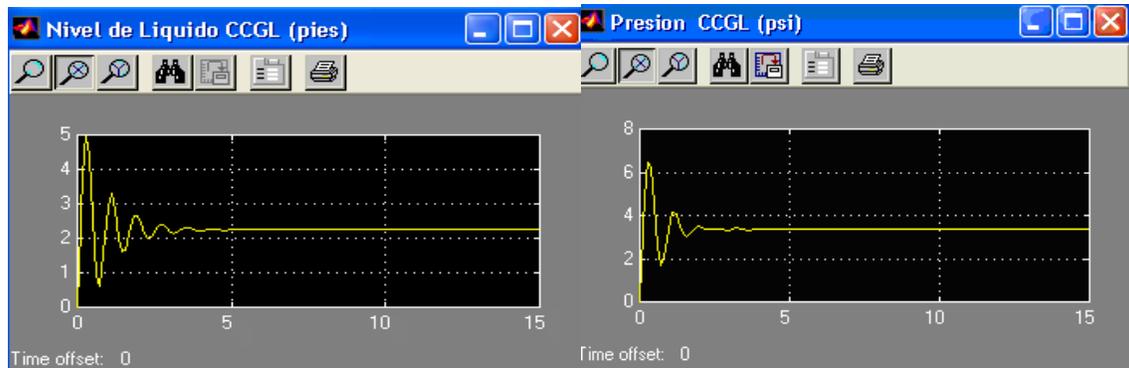
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

**Fig. 6.11. Caso 10. (Proporcional-Integral-Derivativo---Proporcional-Integral-Derivativo). Incremento de Gasto De Líquido.**

---

### 6.10.2. INCREMENTO DE GASTO DE GAS

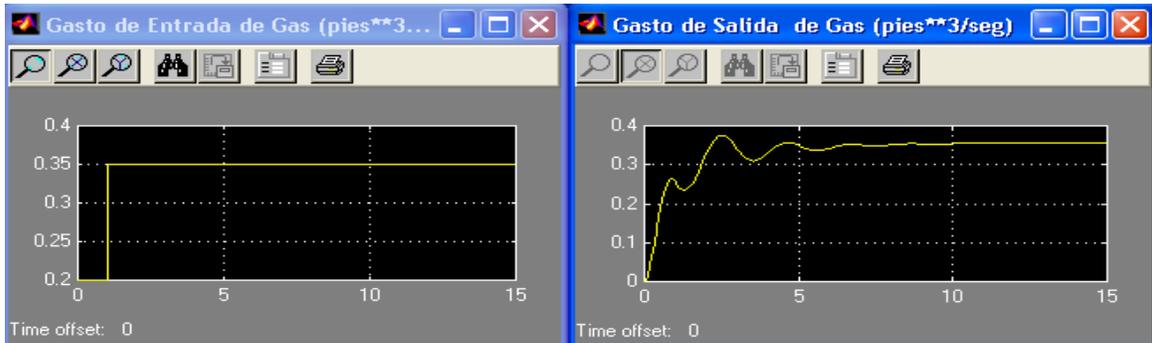
Este caso ilustra el comportamiento del separador CCGL ante una entrada tipo escalón, incrementando el flujo de gas en un 75% y manteniendo el gasto de líquido constante. El sistema de control introduce un controlador Proporcional-Integral-Derivativo para controlar tanto la presión como el nivel de líquido. La figura 6.12 muestra las entradas del sistema y las respuestas dinámicas del mismo. Tanto el flujo de gas como el de líquido retornan a sus valores iniciales de entrada en un tiempo no mayor a 10 segundos, lo cual refleja la acción de los controladores PID instalados.

La válvula de líquido de cierra debido al incremento de presión en el sistema, estabilizándose en una abertura global alrededor del 44%. Como era de esperarse la válvula de gas se abre dejando que el excedente de gas libere el recipiente. Lo importante que se puede destacar es lo rápido con que el sistema logra su estabilización en comparación con los casos anteriores. La presión y el nivel de líquido regresan al punto de ajuste después de la perturbación causada por el cambio en el gasto de gas, como resultado de la acción de los controladores PID. El nivel de líquido refleja la acción del incremento del gasto de gas. Es importante destacar que los dos últimos casos tanto la presión como el nivel de líquido llegaron a sus puntos de ajuste, pero en el caso donde hubo un incremento de líquido, se observó que el nivel de líquido alcanzó valores más elevados y en el caso donde hubo incremento de gas, la presión alcanzó valores más elevados durante los primeros segundos.



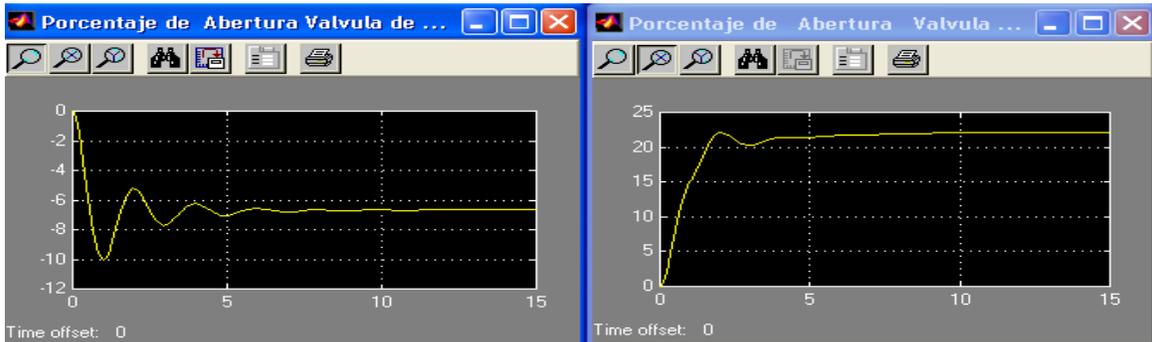
a. Gasto de Entrada de Líquido.

b. Gasto de Salida de Líquido.



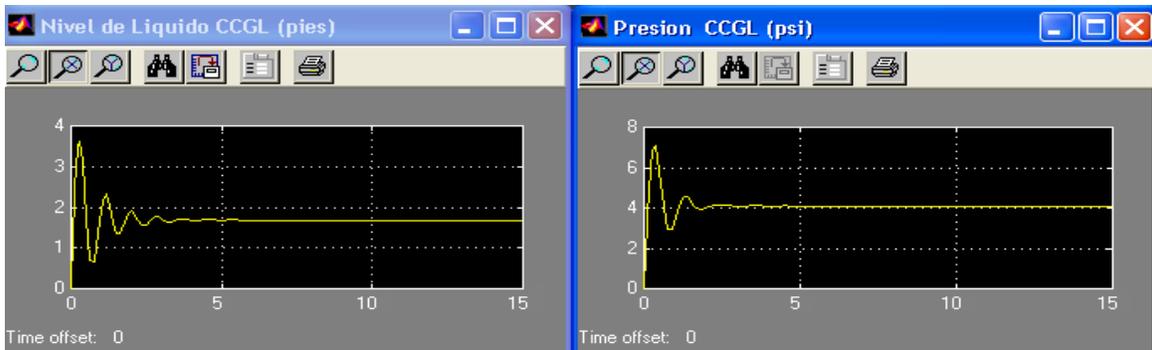
c. Gasto de Entrada de Gas.

d. Gasto de Salida de Gas.



e. Porcentaje Abertura Válvula de Líquido.

f. Porcentaje Abertura Válvula de Gas.



g. Nivel de Líquido CCGL.

h. Presión CCGL.

**Fig. 6.12. Caso 10. (Proporcional-Integral-Derivativo---Proporcional-Integral-Derivativo). Incremento de Gasto De Gas.**

---

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

El funcionamiento de un separador Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido puede ser mejorado considerablemente mediante la implementación de una buena estrategia de control ya que puede ayudar a eliminar el arrastre de líquido en la línea gas o del flujo de gas en la línea de líquido. En este estudio se desarrolló un modelo matemático para el sistema de control de un separador CCGL, introduciendo un lazo de control para el nivel de líquido del recipiente y otro para la presión del gas. Basado en el estudio teórico llevado a cabo y las simulaciones dinámicas realizadas, se tienen las siguientes conclusiones:

1. Un modelo matemático fue desarrollado basado en las ecuaciones de balance de masa de gas y líquido en un separador CCGL y con la ayuda de estudios previos de la Universidad de Tulsa (Wang<sup>14</sup>). Este modelo ayudó a describir las características y respuestas transitorias del comportamiento del separador. El modelo incorpora teoría de sistemas de control lineal y puede ser usado para simular el funcionamiento de cualquier tipo de controlador comercial (Proporcional, Integral, Derivativo o una combinación de estos) y cualquier tipo de condiciones de flujo de entrada.

2. El modelo fue parcialmente validado usando datos experimentales tomados de trabajos desarrollados por el grupo de investigación de proyectos de separación del Departamento de Petróleo de la Universidad de Tulsa, a través de su separador CCGL de prueba. Los resultados indicaron que asumiendo datos razonables de entrada para los controladores y las características de las válvulas, el modelo provee predicciones muy acertadas tanto para el nivel de líquido como la presión del separador.

---

3. Con los resultados obtenidos se concluye que es imprescindible instalar sistemas de control en todas las aplicaciones de campo en que se han venido usando los separadores compactos, esto con la finalidad de evitar posibles arrastres de una fase en otra, principalmente cuando se produce aumentos considerables inesperados en el flujo de entrada multifásico.

4. Un simulador fue construido usando el software Matlab/Simulink para evaluar el comportamiento de un separador CCGL de 10 pies de altura y 0.25 pies de diámetro bajo diferentes estrategias de control y asumiendo diferentes condiciones de entrada, simulando el arribo de baches de gas y líquido al sistema.

5. No es conveniente incorporar un controlador Proporcional para el nivel de líquido o presión de gas cuando se espera que el separador trabaje bajo condiciones de bacheo severo, esto es debido a que se puede inundar el separador y hay más posibilidad de que ocurra arrastre de líquido en la línea de gas o flujo de gas en la línea de líquido.

6. La acción del controlador Derivativo añadida al controlador Proporcional en lugar de un controlador sólo Proporcional para el nivel de líquido cuando se incrementa el gasto de líquido ayudó a disminuir el tiempo de estabilización del sistema, es decir, el tiempo en donde se alcanza un nivel de líquido y una presión constante en el separador, lo cual no permitió que el separador alcanzase niveles posibles de inundación.

7. El beneficio de tener un controlador Proporcional-Integral o Proporcional-Integral-Derivativo para el nivel de líquido cuando se manejan baches de líquido a la entrada del separador es muy positivo en comparación con tener un controlador Proporcional o Proporcional-Derivativo ya que el nivel de líquido

---

logra retornar a su punto de ajuste y no alcanza niveles tan altos que puedan producir la inundación del separador.

8. La incorporación de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo en el nivel de líquido en lugar de un controlador Proporcional-Integral cuando se simula una entrada de bache de líquido al separador ayuda considerablemente a mejorar la estabilidad del sistema y a disminuir el tiempo con que la variable controlada retorna a su punto de ajuste.

9. La acción Derivativa añadida al controlador Proporcional-Integral para la presión del gas cuando se simuló el arribo de un bache de gas al separador incrementó la estabilidad del sistema y aceleró que la desviación estable o error de la presión tendiera a un valor muy cercano a cero, en comparación con la acción del controlador Proporcional-Integral.

10. La mejor estrategia de control obtenida para simular tanto el arribo de un bache de líquido como el arribo de un bache de gas al separador es la incorporación de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo tanto para el nivel de líquido como para la presión del gas, ya que se asegura que las dos variables controladas retornen a su punto de ajuste y el tiempo de estabilización de ambos lazos sea el más rápido posible.

11. Se verificó una interdependencia del comportamiento dinámico entre el sistema de control del nivel de líquido y el sistema de control de la presión del gas, esto se debe a que se desarrollaron dos subsistemas de control independientes.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

Las siguientes recomendaciones pueden ser llevadas a cabo en próximos estudios de tal manera de expandir el alcance de esta investigación:

- 
1. Considerar en el modelo matemático el posible arrastre de una fase en otra, de tal manera de ajustar los parámetros del sistema de control a unas condiciones que eliminen por completo este fenómeno.
  2. Llevar a cabo más comparaciones entre las predicciones del modelo y datos experimentales o mejor aún datos tomados de separadores CCGL instalados en campos petroleros, de tal manera de realizar más validaciones del comportamiento dinámico del simulador.
  3. Realizar un procedimiento para el diseño óptimo de las ganancias de los controladores, tiempos integrales y tiempos derivativos y no fijarlos como constantes, lo cual ayudaría a simular separadores CCGL de gran escala, con diámetros mayores a 0.25 pies.
  4. Resolver el sistema de ecuaciones diferenciales del modelo matemático propuesto mediante métodos numéricos y realizar comparaciones con el método lineal en funciones de transferencia utilizado en este estudio, con el objeto de verificar que las aproximaciones realizadas durante la linealización del modelo no afecten sus resultados en gran magnitud.
  5. Replantear el modelo matemático de tal forma que se fije una determinada estrategia de control con un escenario de producción y que las salidas del modelo determinen el dimensionamiento apropiado del separador CCGL, es decir, aprovechar el modelo propuesto y utilizarlo para el diseño de separadores CCGL.
  6. El campo de aplicación de sistemas de control en la industria petrolera es muy amplio, por lo tanto es importante que otras estrategias de control sean desarrolladas e investigadas para nuevas aplicaciones en el futuro. Entre las

---

aplicaciones más importantes que puedan ser útiles para mejorar y optimizar la producción de hidrocarburos se pueden mencionar las siguientes:

- ✓ Desarrollo de sistemas de control pasivo para aplicaciones de control en locaciones remotas, en donde la energía no está disponible o es muy costosa.
- ✓ Desarrollo de sistemas de control de producción integrado, es decir, tener todas las instalaciones de campo automatizadas y controladas desde una loción remota.
- ✓ Desarrollo de un sistema de control para una batería de separación, mediante la incorporación de una estrategia de control integrada para varias etapas de separación.
- ✓ Desarrollo de sistemas de control para aplicaciones de operaciones a fondo de pozo, como separación o bombeo de fondo, en donde se tengan los llamados pozos inteligentes.

---

## NOMENCLATURA

|                        |   |
|------------------------|---|
| A                      | Área, (pies <sup>2</sup> )  |
| c                      | Variable Controlada, (adim)   |
| C <sub>oG</sub>        | Parámetro de la Válvula de Control relacionado al tiempo de respuesta de la Válvula de Gas, (seg)     |
| C <sub>oL</sub>        | Parámetro de la Válvula de Control relacionado al tiempo de respuesta de la Válvula de Líquido, (seg) |
| C <sub>vG</sub>        | Coeficiente de Flujo de la Válvula de Control de Gas, (seg)   |
| C <sub>vL</sub>        | Coeficiente de Flujo de la Válvula de Control de Líquido, (seg)                                       |
| d, d <sub>CCGL</sub>   | Diámetro del Separador, (pies)  |
| dC <sub>vG</sub> /dt   | Tasa de Cambio del Coeficiente de Flujo de la Válvula de Control de Gas, (seg/seg)                    |
| dC <sub>vL</sub> /dt   | Tasa de Cambio del Coeficiente de Flujo de la Válvula de Control de Líquido, (seg/seg)                |
| de <sub>G</sub> /dt    | Tasa de cambio del error del Controlador de Gas, (psig/seg)   |
| de <sub>L</sub> /dt    | Tasa de cambio del error del Controlador de Líquido, (psig/seg)                                       |
| dΔe <sub>G</sub> / dt  | Tasa de cambio en variables de perturbación del Error del Controlador de Gas, (psig/seg)              |
| dΔe <sub>L</sub> / dt  | Tasa de cambio en variables de perturbación del Error del Controlador de Líquido, (psig/seg)          |
| dH/dt                  | Tasa de Cambio del Nivel de Líquido, (pies/seg)   |
| dH <sub>CCGL</sub> /dt | Tasa de Cambio del Nivel de Líquido, (pies/seg)   |
| dn <sub>G</sub> /dt    | Tasa de Cambio en los Moles de Gas (Lb-mol/seg)   |
| dΔn <sub>G</sub> / dt  | Tasa de cambio en variables de perturbación de los Moles de Gas, (Lb-mol/seg)                         |
| dP/dt                  | Tasa de Cambio de la Presión en el Separador CCGL (psia/dt)   |
| dP <sub>CCGL</sub> /dt | Tasa de Cambio de la Presión en el Separador CCGL (psia/dt)   |
| dP <sub>cG</sub> /dt   | Tasa de Cambio de la Presión del Controlador de Gas (psig/dt)   |

---

|                           |   |
|---------------------------|---|
| $dP_{VL}/dt$              | Tasa de Cambio de la Presión Neumática de de la Válvula de Control de Líquido, (psig/seg)                           |
| $dP_{VG}/dt$              | Tasa de Cambio de la Presión Neumática de de la Válvula de Control de Gas, (psig/seg)                               |
| $d\Delta H / dt$          | Tasa de Cambio en variables de perturbación del Nivel de Líquido, (pies/seg)  |
| $d\Delta P_{cG} / dt$     | Tasa de Cambio en variables de perturbación de la Presión del Controlador de Gas, (psig/seg)                        |
| $d\Delta P_{cL} / dt$     | Tasa de Cambio en variables de perturbación de la Presión del Controlador de Líquido, (psig/seg)                    |
| $d\Delta P_{vG} / dt$     | Tasa de Cambio en variables de perturbación de la Presión Neumática de la Válvula de Control de Gas, (psig/seg)     |
| $d\Delta P_{vL} / dt$     | Tasa de Cambio en variables de perturbación de la Presión Neumática de la Válvula de Control de Líquido, (psig/seg) |
| $d(\text{Vol})_G/dt$      | Tasa de Cambio del Volumen de Gas (pies <sup>3</sup> /seg)  |
| $d(\text{Vol})_L/dt$      | Tasa de Cambio del Volumen de Líquido (pies <sup>3</sup> /seg)  |
| $dVol_{CCGL} / dt$        | Tasa de Cambio en variables del Volumen del Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> /seg)                                |
| $d\Delta Vol_{CCGL} / dt$ | Tasa de Cambio en variables de perturbación del Volumen del Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> /seg)                |
| $d\Delta Vol_L / dt$      | Tasa de Cambio en variables de perturbación del Volumen de Líquido, (pies <sup>3</sup> /seg)                        |
| $d\chi_G / dt$            | Tasa de Cambio de la Posición de la Válvula de Gas, (seg <sup>-1</sup> )  |
| $d\chi_L / dt$            | Tasa de Cambio de la Posición de la Válvula de Líquido, (seg <sup>-1</sup> )  |
| $d\Delta\chi_G / dt$      | Tasa de Cambio en variables de perturbación de la Posición de la Válvula de Gas, (seg <sup>-1</sup> )               |
| $d\Delta\chi_L / dt$      | Tasa de Cambio en variables de perturbación de la Posición de la Válvula de Líquido, (seg <sup>-1</sup> )           |
| E(t)                      | Error, (adim)   |

---

---

|                     |  |
|---------------------|--|
| $E^*(s)$            | Error en Transformada de Laplace, (adim)                           |
| $e_G$               | Señal del Error del Transmisor de Gas, (psig)                      |
| $e_{Gmin}$          | Señal del Error Mínimo del Transmisor de Gas, (psig)               |
| $e_{Gmax}$          | Señal del Error Máximo del Transmisor de Gas, (psig)               |
| $e_{Gajuste}$       | Señal del Error de Ajuste del Transmisor de Gas, (psig)            |
| $e_L$               | Señal del Error del Transmisor de Líquido, (psig)                  |
| $e_{Lmin}$          | Señal del Error Mínimo del Transmisor de Líquido, (psig)           |
| $e_{Lmax}$          | Señal del Error Máximo del Transmisor de Líquido, (psig)           |
| $e_{Lajuste}$       | Señal del Error de Ajuste del Transmisor de Líquido, (psig)        |
| $F$                 | Factor Geométrico de la Tubería, (adim)                            |
| $F(s)$              | Función de Variable Compleja, (adim)                               |
| $G(s)$              | Función de Transferencia del sistema en s, (adim)                  |
| $G_c^*(s)$          | Función de Transferencia en Transformada de Laplace, (adim)        |
| $H$                 | Nivel de Líquido del Separador, (pies)                             |
| $H_{CCGL}$          | Altura total del Separador, (pies)                                 |
| $H_{CCGL_{min}}$    | Nivel de Líquido Mínimo del Separador, (pies)                      |
| $H_{CCGL_{max}}$    | Nivel de Líquido Máximo del Separador, (pies)                      |
| $H_{CCGL_{ajuste}}$ | Nivel de Líquido de Ajuste del Separador, (pies)                   |
| $K_c$               | Constante del Controlador, (adim)                                  |
| $K_{cG}$            | Ganancia del Controlador de Gas, (adim)                            |
| $K_{cL}$            | Ganancia del Controlador de Líquido, (adim)                        |
| $K_{TG}$            | Ganancia del Transmisor de Gas, (adim)                             |
| $K_{TL}$            | Ganancia del Transmisor de Líquido, (adim)                         |
| $K_p$               | Constante de Proporcionalidad, (adim)                              |
| $m(t)$              | Señal de salida del Controlador, (adim)                            |
| $m_o$               | Salida inicial del Controlador, (adim)                             |
| $M^*(s)$            | Señal de salida del Controlador en Transformada de Laplace, (adim) |
| $M_G$               | Peso Molecular del Gas, (Lb/Lb-mol)                                |

---

---

|                    |  |
|--------------------|--|
| $N_7$              | Constante Numérica, (adim)                                     |
| $n_G$              | Número de Moles de Gas, (Lb-mol)                               |
| $P, P_{CCGL}$      | Presión del Separador Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido, (psia) |
| $P_L$              | Presión de Descarga de Líquido, (psia)                         |
| $P_{CCGL\_min}$    | Presión Mínima del Separador CCGL, (psia)                      |
| $P_{CCGL\_max}$    | Presión Máxima del Separador CCGL, (psia)                      |
| $P_{CCGL\_ajuste}$ | Presión de ajuste del separador CCGL, (psia)                   |
| $P_{cG}$           | Presión del Controlador de Gas, (psig)                         |
| $P_{oG}$           | Presión Inicial del Controlador de Gas, (psig)                 |
| $P_{cL}$           | Presión del Controlador de Líquido, (psig)                     |
| $P_{oL}$           | Presión Inicial del Controlador de Líquido, (psig)             |
| $P_{TG}$           | Presión del Transmisor de Gas, (psig)                          |
| $P_{TG\_min}$      | Presión Mínima del Transmisor de Gas, (psig)                   |
| $P_{TG\_max}$      | Presión Máxima del Transmisor de Gas, (psig)                   |
| $P_{TG\_ajuste}$   | Presión de ajuste del Transmisor de Gas, (psig)                |
| $P_{TL}$           | Presión del Transmisor de Líquido, (psig)                      |
| $P_{TL\_min}$      | Presión Mínima del Transmisor de Líquido, (psig)               |
| $P_{TL\_max}$      | Presión Máxima del Transmisor de Líquido, (psig)               |
| $P_{TL\_ajuste}$   | Presión de ajuste del Transmisor de Líquido, (psig)            |
| $P_{vG}$           | Presión recibida en la Válvula de Gas, (psig)                  |
| $P_{vL}$           | Presión recibida en la Válvula de Líquido, (psig)              |
| $Q_G$              | Gasto de Gas, (pies <sup>3</sup> /seg)                         |
| $Q_L$              | Gasto de Líquido, (pies <sup>3</sup> /seg)                     |
| $Q_{Gentrada}$     | Gasto de entrada de Gas, (pies <sup>3</sup> /seg)              |
| $Q_{Gsalida}$      | Gasto de salida de Gas, (pies <sup>3</sup> /seg)               |
| $Q_{Lentrada}$     | Gasto de entrada de Líquido, (pies <sup>3</sup> /seg)          |
| $Q_{Lsalida}$      | Gasto de salida de Líquido, (pies <sup>3</sup> /seg)           |
| $Q_{Gsalida\_max}$ | Gasto máximo de salida de Gas, (pies <sup>3</sup> /seg)        |
| $Q_{Lsalida\_max}$ | Gasto máximo de salida de Líquido, (pies <sup>3</sup> /seg)    |

---

---

|                            |   |
|----------------------------|---|
| R                          | Constante Universal de los Gases, (psia-pies <sup>3</sup> /Lb-mol-R)    |
| T                          | Temperatura de separación, (°F)   |
| T <sub>I</sub>             | Tiempo de Integración, (seg)  |
| T <sub>IG</sub>            | Tiempo de Integración del Controlador de Gas, (seg)                     |
| T <sub>IL</sub>            | Tiempo de Integración del Controlador de Líquido, (seg)                 |
| T <sub>D</sub>             | Tiempo Derivativo, (seg)  |
| T <sub>DG</sub>            | Tiempo Derivativo del Controlador de Gas, (seg)                         |
| T <sub>DL</sub>            | Tiempo Derivativo del Controlador de Líquido, (seg)                     |
| T <sub>r</sub>             | Tiempo de Reiniciación, (seg)   |
| Vol <sub>CCGL</sub>        | Volumen del Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )                        |
| Vol <sub>CCGL_min</sub>    | Volumen Mínimo del Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )                 |
| Vol <sub>CCGL_max</sub>    | Volumen Máximo del Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )                 |
| Vol <sub>CCGL_ajuste</sub> | Volumen de ajuste del Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )              |
| Vol <sub>liq</sub>         | Volumen de Líquido, (pies <sup>3</sup> )                                |
| Vol <sub>Liq_min</sub>     | Volumen de Líquido Mínimo en el Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )    |
| Vol <sub>Liq_max</sub>     | Volumen de Líquido Máximo en el Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )    |
| Vol <sub>Liq_ajuste</sub>  | Volumen de Líquido de ajuste en el Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> ) |
| Vol <sub>Gas</sub>         | Volumen de Gas, (pies <sup>3</sup> )                                    |
| Vol <sub>Gas_min</sub>     | Volumen de Gas Mínimo en el Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )        |
| Vol <sub>Gas_max</sub>     | Volumen de Gas Máximo en el Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )        |
| Vol <sub>Gas_ajuste</sub>  | Volumen de Gas de ajuste en el Separador CCGL, (pies <sup>3</sup> )     |
| V <sub>sL</sub>            | Velocidad superficial de Líquido, (pies/seg)                            |
| V <sub>sG</sub>            | Velocidad superficial de Gas, (pies/seg)                                |
| u(t)                       | Señal Actuante, (adim)  |
| U(s)                       | Variable de entrada al sistema en s, (adim)                             |
| x                          | Caída de Presión, (psia)  |
| Y                          | Factor de Expansión del Gas, (adim)                                     |
| Z                          | Factor de Compresibilidad del Gas, (adim)                               |

---

## ABREVIATURAS

|        |  |
|--------|--|
| API    | Grado "American Petroleum Institute"       |
| atm    | Atmósfera                                  |
| bls    | Barriles                                   |
| °C     | Grado Centígrado                           |
| CCGL   | Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido           |
| D      | Derivativo                                 |
| e      | Estímulo                                   |
| °F     | Grado Farenheit                            |
| Fig.   | Figura                                     |
| FT     | Función de Transferencia                   |
| I      | Integral                                   |
| Kg     | Kilogramos                                 |
| Km     | Kilómetros                                 |
| Lb     | Libras                                     |
| ma     | Mili-Ampere                                |
| MMPC   | Millones de Pies Cúbicos                   |
| MPC    | Miles de Pies Cúbicos                      |
| mts    | Metros                                     |
| P      | Proporcional                               |
| PD     | Proporcional-Derivativo                    |
| pg     | Pulgadas                                   |
| PI     | Proporcional-Integral                      |
| PID    | Proporcional-Integral-Derivativo           |
| psia   | Libras por pulgadas cuadradas absolutas    |
| psig   | Libras por pulgadas cuadradas manométricas |
| r      | Entrada de Referencia                      |
| seg, s | Segundos                                   |

---

## LETRAS GRIEGAS

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\gamma_L$      | Gravedad Específica del Líquido  |
| $\gamma_G$      | Gravedad Específica del Gas  |
| $\mu$           | Viscosidad, (Lb/pg-seg)  |
| $\mu_L$         | Viscosidad del Líquido, (Lb/pies-seg)  |
| $\mu_G$         | Viscosidad del Gas, (Lb/pies-seg)  |
| $\rho$          | Densidad Absoluta, (Lb/pies <sup>3</sup> )                                     |
| $\rho_L$        | Densidad Absoluta del Líquido, (Lb/pies <sup>3</sup> )                         |
| $\rho_G$        | Densidad Absoluta del Gas, (Lb/pies <sup>3</sup> )                             |
| $\tau_{oL}$     | Constante de Tiempo de la Línea de Transmisión Neumática de Líquido, (seg)     |
| $\tau_{oG}$     | Constante de Tiempo de la Línea de Transmisión Neumática de Gas, (seg)         |
| $\Delta e_G$    | Señal del Error del Transmisor de Gas en variables de perturbación, (psig)     |
| $\Delta e_L$    | Señal del Error del Transmisor de Líquido en variables de perturbación, (psig) |
| $\Delta H$      | Nivel de Líquido en variables de perturbación, (pies)                          |
| $\Delta P_{TG}$ | Presión del Transmisor de Gas en variables de perturbación, (psig)             |
| $\Delta P_{TL}$ | Presión del Transmisor de Líquido en variables de perturbación, (psig)         |
| $\Delta P_{CG}$ | Presión del Controlador de Gas en variables de perturbación, (psig)            |
| $\Delta P_{CL}$ | Presión del Controlador de Líquido en variables de perturbación, (psig)        |
| $\Delta P_{VG}$ | Presión recibida en la Válvula de Gas en variables de perturbación, (psig)     |

---

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $\Delta P_{VL}$       | Presión recibida en la válvula de Líquido en variables de perturbación, (psig)     |
| $\Delta Q_{Lentrada}$ | Gasto de entrada de Líquido en variables de perturbación, (pies <sup>3</sup> /seg) |
| $\Delta Q_{Lsalida}$  | Gasto de salida de Líquido en variables de perturbación, (pies <sup>3</sup> /seg)  |
| $\Delta Q_{Gentrada}$ | Gasto de entrada de Gas en variables de perturbación, (pies <sup>3</sup> /seg)     |
| $\Delta Q_{Gsalida}$  | Gasto de salida de Gas en variables de perturbación, (pies <sup>3</sup> /seg)      |
| $\Delta \chi_G$       | Posición de la Válvula de Control de Gas en variables de perturbación, (%)         |
| $\Delta \chi_L$       | Posición de la Válvula de Control de Líquido en variables de perturbación, (%)     |
| $\chi_G$              | Posición de la Válvula de Control de Gas, (%)                                      |
| $\chi_L$              | Posición de la Válvula de Control de Líquido, (%)                                  |

---

## A. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SISTEMAS DE CONTROL

### A.1 Concepto de Sistema

Arreglo de elementos conectados o relacionados entre sí de tal manera que forman y actúen como una unidad entera.

### A.2 Concepto de Sistema de Control

Interacción de componentes dispuestos en una secuencia tal que el conjunto produzca una respuesta deseada regulándose a él mismo o a otro sistema.

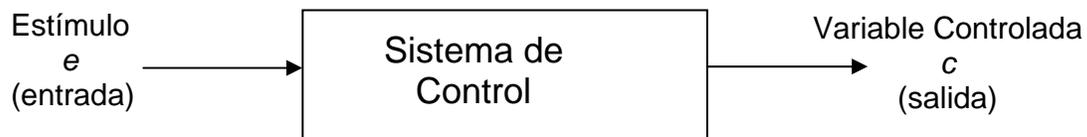


Fig. A.1 Esquemático de un Sistema de Control.

### A.3 Objetivo del Sistema de Control

Controlar la variable  $c$  de una manera recomendada por la señal actuadora o estímulo  $e$ , a través de los elementos del Sistema de Control.

### A.4 Concepto de Diagramas de Bloques

En la Figura A.2 se observa un diagrama de bloque típico

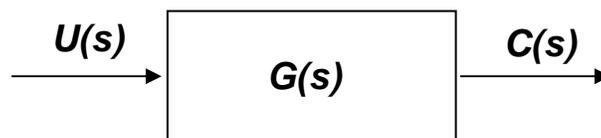


Fig. A.2 Esquemático de un Diagrama de Bloque.

---

$U(s)$  = Variable de entrada o de excitación al sistema en  $s$ .

$G(s)$  = Función de Transferencia del sistema en  $s$ .

$C(s)$  = Variable de salida o controlada del sistema en  $s$ .

Se define:  $C(s) = U(s) G(s)$

Algunas características de los diagramas de bloques son:

- ✓ Describen una ecuación diferencial la cual representa a un sistema físico.
- ✓ Contienen información dinámica del proceso pero no información física del mismo.
- ✓ Una función de transferencia puede representar varios procesos y puede ser representada por varios diagramas de bloques.

**Elementos:**

- ✓ Bloques: Contienen las funciones de transferencia.
- ✓ Sumadores: Elementos sumadores de señales.
- ✓ Puntos de bifurcación: Donde una señal parte hacia varios bloques o puntos de suma.

### A.5 Sistema de Control de Lazo Abierto

Son sistemas de control en los que la salida no tiene efecto sobre la variable de entrada



**Fig. A.3 Esquemático de un Sistema de Control de Lazo Abierto.**

## A.6 Sistema de Control de Lazo Cerrado

Lo que le falta a un sistema de control de lazo abierto para obtener un control más preciso y adaptable, es una unión o retroalimentación de la salida a la entrada al sistema.

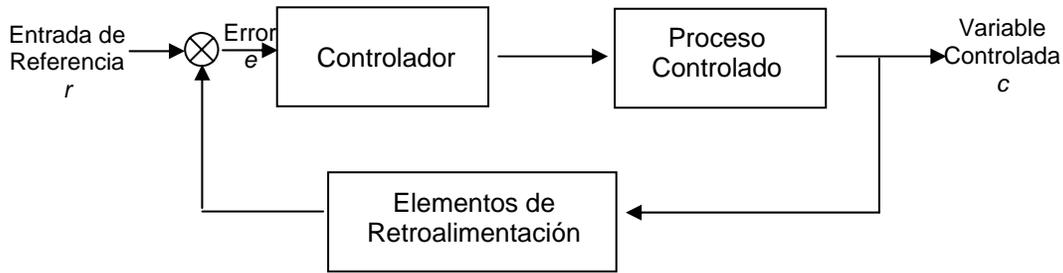


Fig. A.4 Esquemático de un Sistema de Control de Lazo Cerrado.

En la tabla A.1 se presenta una comparación entre los sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado.

| LAZO ABIERTO  | LAZO CERRADO  |
|---|---|
| Para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación, la exactitud del sistema depende de la calibración. | NO APLICA   |
| En presencia de perturbaciones, en sistemas de este tipo no cumple su función asignada.                                     | El uso de retroalimentación hace que la respuesta del sistema sea relativamente insensible a perturbaciones.      |
| La estabilidad se obtiene fácil.  | La estabilidad constituye un problema por la tendencia a sobre corregir errores que pueden producir oscilaciones. |
| Se usa en sistemas en los que las entradas son conocidas previamente y en los que no hay perturbaciones                     | Se usa en aquellas situaciones que se presentan perturbaciones y/o variaciones de componentes del sistema.        |

Tabla A.1 Comparación entre los Sistemas de Control de Lazo Abierto y Cerrado.

---

## A.7 Clasificación de los Sistemas

- ✓ **Determinísticos:** para cada entrada hay una salida que es única.
- ✓ **Estadísticos:** Hay incertidumbre, los parámetros del modelo no son fijos.
- ✓ **Lineales:** Sus modelos pueden representarse con ecuaciones diferenciales lineales.
- ✓ **No Lineales.**
- ✓ **De una entrada y salida.**
- ✓ **Multivariables.**
- ✓ **Continuos.**
- ✓ **Discretos:** Las variables solo toman valores puntuales cada cierto intervalo de tiempo.

## A.8 FUNDAMENTOS MATEMATICOS DE LA TRANSFORMADA DE LAPLACE

Se define sobre  $f(t)$  lineal y continua:

$$L(f(t)) = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (\text{A.1})$$

Donde  $F(s)$  es una función de variable compleja.

### Propiedades de la Transformada:

- ✓ Unicidad.
- ✓ Linealidad:  $L(af_1(t) + bf_2(t)) = aF_1(s) + bF_2(s)$  (A.2)
- ✓  $L(f(t-a)) = e^{-as} F(s)$  (A.3)
- ✓  $L(e^{-at} f(t)) = F(s+a)$  (A.4)
- ✓  $L\left(f\left(\frac{t}{a}\right)\right) = aF(as)$  (A.5)
- ✓  $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$  (A.6)

---

$$\checkmark \quad L\left(\frac{d^k}{dt^k} f(t)\right) = s^k F(s) - s^{k-1} f(0) - s^{k-2} f'(0) - \dots - f^{(k-1)}(0) \quad (\text{A.7})$$

**Algunas Transformadas Típicas:**

$$L(1) = \frac{1}{s} \qquad L(t) = \frac{1}{s^2} \qquad L(t^n) = \frac{n!}{s^{n+1}} \quad (\text{A.8, 9 y 10})$$

$$L(e^{at}) = \frac{1}{s-a} \qquad L(e^{-at}) = \frac{1}{s+a} \quad (\text{A.11 y 12})$$

$$L\sin(at) = \frac{a}{s^2 + a^2} \qquad L\cos(at) = \frac{s}{s^2 + a^2} \quad (\text{A.13 y 14})$$

**B. DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES DE  
LOS DIFERENTES CONTROLADORES**

A continuación se presenta el desarrollo matemático de las ecuaciones diferenciales de los diferentes tipos de controladores que son usados en las estrategias de control especificadas en la tabla 4.1 correspondiente al capítulo 4.

### Caso 1. Proporcional-Proporcional

La descripción matemática de un controlador P (Control de Nivel de Líquido) esta dada por<sup>6</sup>:

$$P_{cL} = K_{cL}e_L + P_{oL} \quad (B.1)$$

En donde  $P_{cL}$  es la presión neumática a ser enviada a la válvula de control,  $P_{oL}$  es la presión inicial en el controlador,  $K_{cL}$  es la ganancia del controlador y  $e_L$  es el error. Similarmente como en el capítulo 4 se pueden definir la presión del transmisor, la presión de ajuste, la ganancia del controlador y el error como:

$$P_{TL} = 3 + 12 \left( \frac{H_{CCGL} - H_{CCGL\min}}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}} \right) \quad (B.2)$$

$$P_{TL\_ajuste} = 3 + 12 \left( \frac{H_{CCGLajuste} - H_{CCGL\min}}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}} \right) \quad (B.3)$$

$$K_{TL} = \frac{12}{H_{CCGL\max} - H_{CCGL\min}} \quad (B.4)$$

$$e_L = K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) \quad (B.5)$$

Introduciendo la ecuación (B.5) en (B.1) tenemos:

$$P_{cL} = K_{cL} K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) + P_{oL} \quad (B.6)$$

Diferenciando con respecto al tiempo, obtenemos la ecuación diferencial del controlador proporcional para el nivel de líquido.

---


$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right) \quad (\text{B.7})$$

Ahora se va a presentar el desarrollo para la ecuación del controlador proporcional P que controla la presión del gas:

$$P_{cG} = K_{cG} e_G + P_{oG} \quad (\text{B.8})$$

Haciendo el mismo procedimiento que en el capítulo 4 se define el error y se introduce en la ecuación (B.8):

$$e_G = K_{TG} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) \quad (\text{B.9})$$

$$P_{cG} = K_{cG} K_{TG} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) + P_{oG} \quad (\text{B.10})$$

Diferenciando la ecuación anterior queda:

$$\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right) \quad (\text{B.11})$$

Por lo tanto las ecuaciones diferenciales de los controladores para el **caso 1** quedan representadas por las Ecs. (B.7) y (B.11).

## Caso 2. Proporcional Integral-Proporcional

Para controlar el nivel de líquido se va a utilizar un controlador integral (PI). La ecuación que lo representa es la siguiente:

$$P_{cL} = P_{oL} + K_{cL} \left( e_L + \frac{1}{T_r} \int e_L dt \right) \quad (\text{B.12})$$

$$P_{cL} = K_{cL} e_L + \frac{K_{cL}}{T_r} \int e_L dt + P_{oL}$$

Introduciendo el valor del error  $e_L$  en la ecuación anterior nos queda:

$$P_{cL} = P_{oL} + K_{cL} \left( K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) + \frac{1}{T_r} \int (K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL})) dt \right) \quad (\text{B.13})$$

$$P_{cL} = P_{oL} + K_{cL} K_{TL} \left( (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) + \frac{1}{T_r} \int (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) dt \right)$$

Diferenciando tenemos:

$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) \right) \quad (\text{B.14})$$

De esta manera las ecuaciones diferenciales para el **caso 2** quedan representadas por las ecuaciones **(B.14)** y **(B.11)**.

### Caso 3. Proporcional Derivativo-Proporcional

La ecuación diferencial para controlar el nivel de líquido con un controlador (PD) fue desarrollada en el capítulo 4, llegándose a la siguiente expresión:

$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right) \quad (\text{B.15})$$

Quedando representado el **caso 3** con las ecuaciones **(B.15)** y **(B.11)**.

### Caso 4. Proporcional Integral Derivativo-Proporcional

La descripción matemática de un controlador PID (Control de Nivel de Líquido) esta dada por<sup>6</sup>:

$$P_{cL} = K_{cL} e_L + \frac{K_{cL}}{T_i} \int e_L dt + K_{cL} T_D \frac{de_L}{dt} \quad (\text{B.16})$$

Introduciendo la Ec. B.5 en la ecuación anterior tenemos:

$$P_{cL} = K_{cL} K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) + \frac{K_{cL}}{T_i} \int K_{TL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) dt + \dots$$

$$\dots + K_{cL} T_D \frac{dK_{cL} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL})}{dt} \quad (\text{B.17})$$

Como  $H_{CCGLajuste}$  es una constante,  $\frac{dH_{CCGLajuste}}{dt} \approx 0$  y la expresión queda como:

$$P_{cL} = K_{cL} K_{TL} \left[ (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) + \frac{1}{T_i} \int (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) dt - T_D \frac{dH_{CCGL}}{dt} \right] \quad (\text{B.18})$$

Diferenciando:

$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left[ \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right) + \frac{1}{T_i} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right] \quad (\text{B.19})$$

Por lo tanto las ecuaciones diferenciales de los controladores para el **caso 4** quedan representadas por las Ecs. **(B.19)** y **(B.11)**.

### Caso 5. Proporcional-Proporcional Integral

Estas ecuaciones fueron desarrolladas previamente y están representadas por las ecuaciones **(B.7)** y **(4.26)**.

### Caso 6. Proporcional-Proporcional Derivativo

Faltaría por definir la expresión para el controlador PD de la presión de gas. La ecuación matemática que representa un PD es la siguiente:

---


$$P_{cG} = P_{oG} + K_{cG} \left( e_G + T_D \frac{de_G}{dt} \right) \quad (\text{B.20})$$

Introduciendo el error Ec. (4.23) en la Ec. (B.20) tenemos:

$$P_{cG} = P_{oG} + K_{cG} \left( K_{TG} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) + T_D \frac{dK_{TL} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL})}{dt} \right) \quad (\text{B.21})$$

Diferenciando y agrupando términos tenemos:

$$\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 P_{CCGL}}{dt^2} \right) \quad (\text{B.22})$$

Así el **caso 6** queda representado por las ecuaciones **(B.7)** y **(B.22)**

### Caso 7. Proporcional-Proporcional Integral Derivativo

Haciendo el mismo procedimiento que en caso 4 pero tomando en cuenta que el controlador PID va a controlar la presión del gas, nos queda la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left[ \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right) + \frac{1}{T_i} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) - T_D \frac{d^2 P_{CCGL}}{dt^2} \right] \quad (\text{B.23})$$

De esta manera el **caso 7** queda representado con las Ecs. **(B.7)** y **(B.23)**.

### Caso 8. Proporcional Integral-Proporcional Derivativo

---

Con el mismo procedimiento del capítulo 4 pero cambiando la posición de los controladores nos quedarían las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) \right) \quad (\text{B.24})$$

$$\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 P_{CCGL}}{dt^2} \right) \quad (\text{B.25})$$

Quedando definido el **caso 8** con las ecuaciones **(B.24)** y **(B.25)**.

### **Caso 9. Proporcional Derivativo-Proporcional Integral**

Ver Capítulo 4. Ecuaciones **(4.26)** y **(4.36)**.

### **Caso 10. Proporcional Integral Derivativo-Proporcional Integral Derivativo**

Ver ecuaciones **(B.19)** y **(B.23)**.

En la tabla B.1 se puede observar de manera resumida las ecuaciones de los controladores para todos los casos.

**Tabla B.1. Ecuación de los Controladores para todos los casos.**

| CASO    | ECUACION PARA EL NIVEL DE LIQUIDO  | ECUACION PARA LA PRESION DEL GAS   |
|---------|--|--|
| P-P     | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right)$  |
| PI-P    | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right)$  |
| PD-P    | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right)$  |
| PID-P   | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left[ \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right) + \frac{1}{T_i} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right]$ | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right)$  |
| P-PI    | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) \right)$  |
| P-PD    | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 P_{CCGL}}{dt^2} \right)$  |
| P-PID   | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left[ \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right) + \frac{1}{T_i} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) - T_D \frac{d^2 P_{CCGL}}{dt^2} \right]$ |
| PI-PD   | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 P_{CCGL}}{dt^2} \right)$  |
| PD-PI   | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right)$  | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} + \frac{1}{T_r} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) \right)$  |
| PID-PID | $\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} K_{TL} \left[ \left( -\frac{dH_{CCGL}}{dt} \right) + \frac{1}{T_i} (H_{CCGLajuste} - H_{CCGL}) - T_D \frac{d^2 H_{CCGL}}{dt^2} \right]$ | $\frac{dP_{cG}}{dt} = K_{cG} K_{TG} \left[ \left( -\frac{dP_{CCGL}}{dt} \right) + \frac{1}{T_i} (P_{CCGLajuste} - P_{CCGL}) - T_D \frac{d^2 P_{CCGL}}{dt^2} \right]$ |

---

## C. DESARROLLO MATEMATICO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LOS CASOS EN ESTUDIO

En este apéndice se van a desarrollar los bloques de transferencia lineales correspondientes a los diferentes casos en estudio. Los únicos bloques que cambian son el número 1 correspondiente al controlador de nivel de líquido y el número 9 correspondiente al controlador de la presión del gas. Los demás bloques quedaran iguales a los que se observan en la figura 4.20.

### Caso 1. Proporcional-Proporcional

Diagrama de Bloque 1. Controlador P. Nivel de Líquido. Tomando la ecuación general del controlador P (B.1) y diferenciándola tenemos:

$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} \left( \frac{de_L}{dt} \right) \quad (\text{C.1})$$

Definiendo las variables de perturbación correspondientes se tiene:

$$\frac{d\Delta P_{cL}}{dt} = K_{cL} \left( \frac{d\Delta e_L}{dt} \right) \quad (\text{C.2})$$

Tomando la transformada de laplace queda:

$$\begin{aligned} sP_{cL}^*(s) &= K_{cL} (s e_L^*(s)) \\ \frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} &= K_{cL} \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

Diagrama de Bloque 9. Controlador P. Presión de Gas. Se sigue el mismo procedimiento anterior. Por lo tanto la función de transferencia queda como:

---

$$\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} \quad (\text{C.4})$$

### **Caso 2. Proporcional Integral-Proporcional**

Diagrama de Bloque 1. Controlador PI. Nivel de Líquido. Tomando como referencia el desarrollo del bloque 9 en el capítulo 4, la correspondiente función de transferencia es la siguiente:

$$\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (\text{C.5})$$

Diagrama de Bloque 9. Controlador P. Presión de Gas. Ver ecuación (C.4).

### **Caso 3. Proporcional Derivativo-Proporcional**

Diagrama de Bloque 1. Controlador PD. Nivel de Líquido. La función de transferencia de un controlador PD para el nivel de líquido fue desarrollada en el capítulo 4, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} (1 + T_D s) \quad (\text{C.6})$$

Diagrama de Bloque 9. Controlador P. Presión de Gas. Ver ecuación (C.4).

### **Caso 4. Proporcional Integral Derivativo-Proporcional**

Diagrama de Bloque 1. Controlador PID. Nivel de Líquido. Tomando la ecuación general del controlador PID (B.16) y diferenciándola se tiene:

---


$$\frac{dP_{cL}}{dt} = K_{cL} \left( \frac{de_L}{dt} + \frac{1}{T_i} e_L + T_D \frac{d^2 e_L}{dt^2} \right) \quad (\text{C.7})$$

Definiendo las respectivas variables de perturbación e introduciéndolas en la ecuación anterior:

$$\frac{d\Delta P_{cL}}{dt} = K_{cL} \left( \frac{d\Delta e_L}{dt} + \frac{1}{T_i} \Delta e_L + T_D \frac{d^2 \Delta e_L}{dt^2} \right) \quad (\text{C.8})$$

Aplicando la transformada de laplace:

$$\begin{aligned} sP_{cL}^*(s) &= K_{cL} \left( s e_L^*(s) + \frac{1}{T_i} e_L^*(s) + T_D s^2 e_L^*(s) \right) \\ P_{cL}^*(s) &= K_{cL} \left( e_L^*(s) + \frac{1}{T_i s} e_L^*(s) + T_D s e_L^*(s) \right) \\ \frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} &= K_{cL} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

Diagrama de Bloque 9. Controlador P. Presión de Gas. Ver ecuación **(C.4)**.

### **Caso 5. Proporcional –Proporcional Integral**

Estas funciones de transferencia ya fueron desarrolladas previamente y están representadas por las ecuaciones **(C.3)** y **(4.68)** para los bloques 1 y 9 respectivamente.

### **Caso 6. Proporcional –Proporcional Derivativo**

Diagrama de Bloque 1. Controlador P. Nivel de Líquido. Ver ecuación **(C.3)**.

---

Diagrama de Bloque 9. Controlador PD. Presión de Gas. Tomando la ecuación (C.6) pero en variables de la presión del gas se tiene:

$$\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG}(1 + T_D s) \quad (\text{C.10})$$

### **Caso 7. Proporcional –Proporcional Integral Derivativo**

Diagrama de Bloque 1. Controlador P. Nivel de Líquido. Ver ecuación (C.3).

Diagrama de Bloque 9. Controlador PID. Presión de Gas.

$$\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (\text{C.11})$$

### **Caso 8. Proporcional Integral –Proporcional Derivativo**

Diagrama de Bloque 1. Controlador PI. Nivel de Líquido. Ver ecuación (C.5).

Diagrama de Bloque 9. Controlador PD. Presión de Gas. Ver ecuación (C.10).

### **Caso 9. Proporcional Derivativo –Proporcional Integral**

Diagrama de Bloque 1. Controlador PD. Nivel de Líquido. Ver ecuación (C.6).

Diagrama de Bloque 9. Controlador PI. Presión de Gas. Ver ecuación (4.68).

### **Caso 10. Proporcional Integral Derivativo–Proporcional Integral Derivativo**

Diagrama de Bloque 1. Controlador PID. Nivel de Líquido. Ver ecuación (C.9).

Diagrama de Bloque 9. Controlador PID. Presión de Gas. Ver ecuación (C.11).

A continuación se presenta una tabla con todas las funciones de transferencia de los controladores para todos los casos de estudio (Tabla C.1). También se puede observar en la figura C.1 el diagrama de bloque general, en donde de acuerdo al caso que se quiera simular se deben introducir las funciones correspondientes.

**Tabla C.1. Funciones de Transferencia de los Controladores para todos los casos.**

| CASO    | FUNCION DE TRANSFERENCIA (FT) PARA EL NIVEL DE LIQUIDO. BLOQUE 1                   | FT PARA LA PRESION DEL GAS. BLOQUE 9   |
|---------|--|--|
| P-P     | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL}$  | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG}$  |
| PI-P    | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} \left( 1 + \frac{1}{T_r s} \right)$         | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG}$  |
| PD-P    | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} (1 + T_D s)$                                | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG}$  |
| PID-P   | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$ | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG}$  |
| P-PI    | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL}$  | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} \left( 1 + \frac{1}{T_r s} \right)$         |
| P-PD    | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL}$  | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} (1 + T_D s)$                                |
| P-PID   | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL}$  | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$ |
| PI-PD   | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} \left( 1 + \frac{1}{T_r s} \right)$         | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} (1 + T_D s)$                                |
| PD-PI   | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} (1 + T_D s)$                                | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} \left( 1 + \frac{1}{T_r s} \right)$         |
| PID-PID | $\frac{P_{cL}^*(s)}{e_L^*(s)} = K_{cL} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$ | $\frac{P_{cG}^*(s)}{e_G^*(s)} = K_{cG} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$ |

## D. CONSTRUCCION DEL MODELO MATEMATICO EN EL SIMULADOR MATLAB/SIMULINK

En el presente apéndice se muestran brevemente los pasos necesarios para construir el diagrama de bloques general del proceso de control a partir del modelo matemático generado en el capítulo 4.

El primer paso para iniciar la construcción del modelo es el crear un nuevo modelo en el módulo Simulink del software Matlab. En la Figura D.1 se muestra la ventana donde se puede crear este nuevo modelo.

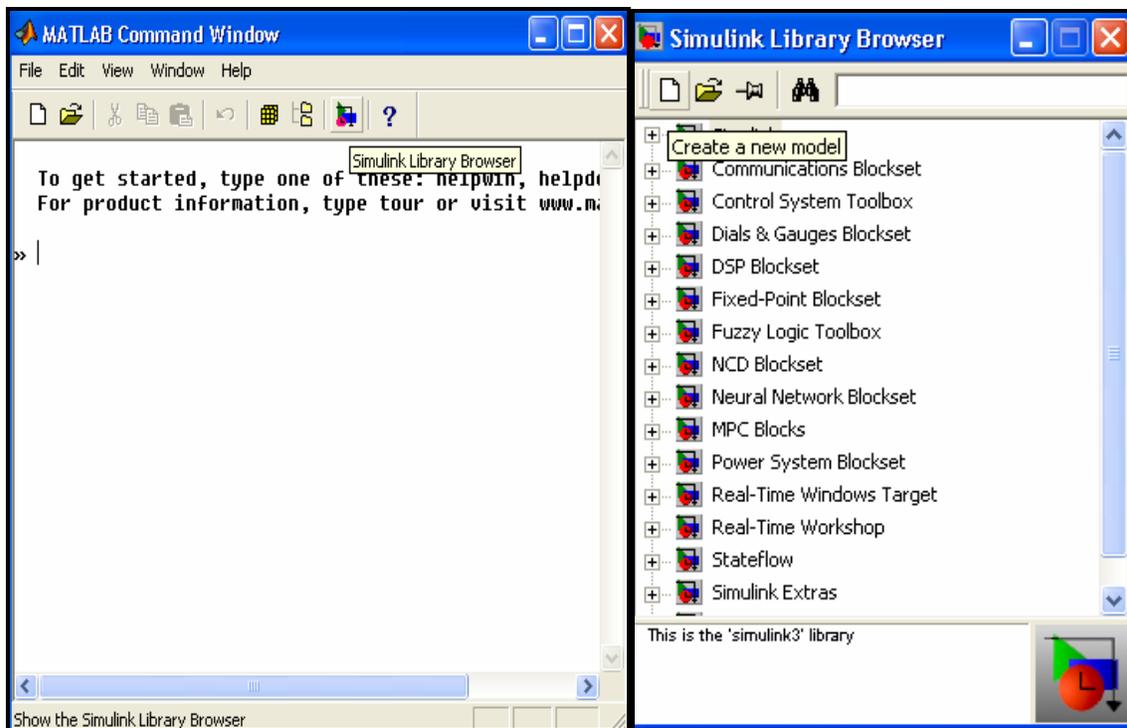


Fig. D.1 Ventana para crear un nuevo modelo en Matlab/Simulink.

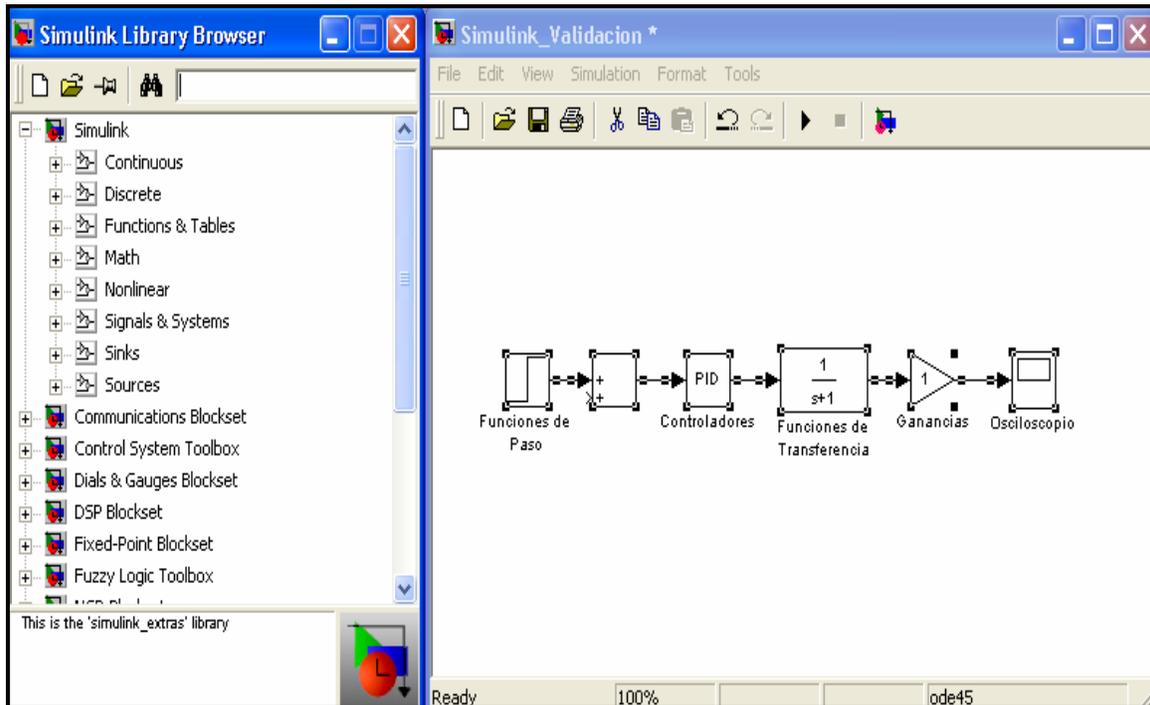
Es muy sencilla la construcción del diagrama de bloques del sistema de control que se pretende simular. Una vez que se tiene la pantalla donde se van a colocar las funciones de transferencia del diagrama de bloques, se empieza a

---

buscar los bloques que se necesitan para crear el diagrama. Para representar la figura 4.20 del capítulo 4 se necesitan los siguientes componentes:

- ✓ **Ganancias:** Son las relaciones constantes obtenidas de la aplicación de la transformada de laplace, las cuales representan diferentes tipos de ganancias del sistema. Los bloques que se representan como ganancias del modelo son los números 4, 5, 7, 8, 12, 13,15 y 16.
- ✓ **Funciones de Transferencia:** Son las relaciones no constantes que se obtuvieron también a partir de la aplicación de la transformada de laplace, que están en función de la variable  $s$ . Los bloques que se representan como funciones de transferencia son los números 2, 3, 6, 10,11 y 14.
- ✓ **Elementos Sumadores:** Son elementos conectores que permiten que varias señales entren al mismo punto nodal.
- ✓ **Funciones de Paso:** Representan las entradas de gastos de líquido y gas al sistema mediante una función tipo escalón o paso.
- ✓ **Controladores:** Representan los diferentes tipos de controladores que se van a utilizar en el sistema para realizar las diferentes simulaciones de los casos propuestos.
- ✓ **Osciloscopio:** Se va a utilizar para observar las salidas del sistema, las cuales son la entrada y salida de gastos, la abertura de las válvulas de líquido y gas, el nivel de líquido y la presión en el separador CCGL.

En la figura D.2 se observa la ventana de donde se pueden extraer los diferentes bloques descritos anteriormente y la colocación de los mismos para la creación de un nuevo modelo.



**Fig. D.2** Ventana de donde se extraen los bloques para la construcción del diagrama.

Una vez que se tienen las diferentes herramientas de bloques en la ventana del nuevo modelo, se procede a construirlo exactamente como se dedujo del modelo matemático. En la figura D.3 se observa esta representación general, sin datos de entrada, solo los bloques y sus conexiones correspondientes. Es importante destacar que las entradas de gastos de líquido y gas al sistema van a ser representadas por funciones de paso o escalón. Las ecuaciones que describen los diferentes tipos de controladores están previamente programadas en el simulador, únicamente hay que introducir las características de cada tipo de controlador. En las funciones de transferencia hay que introducir los coeficientes del numerador y denominador de la función y por último en las ganancias el valor constante obtenido de la relación o ecuación.

A continuación se presentan las ventanas en donde se introducen los datos de entrada de cada tipo de bloque.

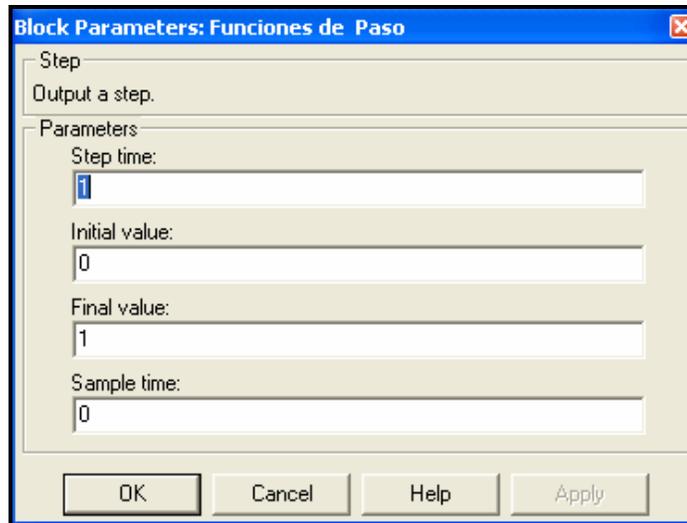


Fig. D.4 Ventana de datos de entrada de la función de paso o escalón.

En la figura D.4 se muestra la ventana en donde hay que introducir el gasto de entrada, bien sea de gas o de líquido. El tiempo de paso representan los segundos en donde el gasto se va a incrementar, de esta manera se puede simular una entrada de bache al sistema. El valor inicial es el gasto inicial de líquido o gas y el valor final es el gasto total, tomando en cuenta el bache.

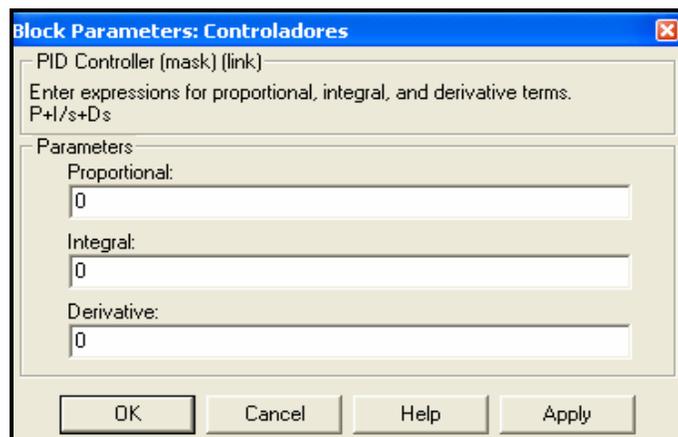


Fig. D.5 Ventana de datos de entrada de los controladores.

La figura anterior muestra la ventana en donde hay que introducir los parámetros de diseño de los controladores. De acuerdo al tipo de controlador que se desee simular, se llenan los espacios correspondientes con los parámetros de diseño. La ganancia del controlador siempre se va a colocar en el espacio del Proporcional y los tiempos integrales y derivativos se colocan en sus espacios correspondientes.

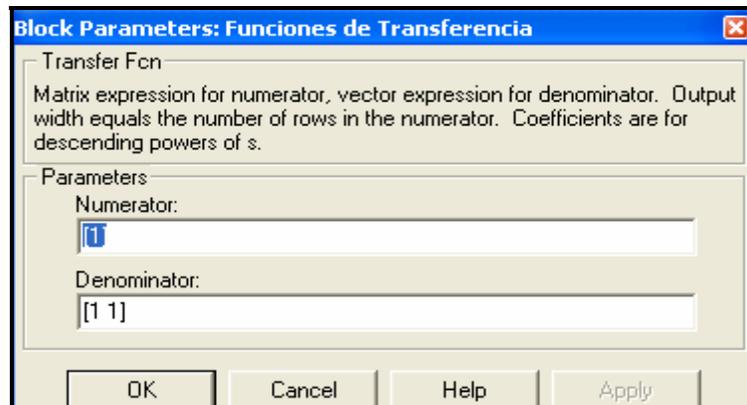


Fig. D.6 Ventana de datos de entrada de las funciones de transferencia.

En la figura D.6 se tienen que introducir los coeficientes del numerador y denominador de la función de transferencia obtenida del modelo matemático. Si la función de transferencia tiene más variables, estas aparecerán en la ventana, en este caso se está poniendo el ejemplo de una función de transferencia simple como las que se obtuvieron del modelo matemático desarrollado en el capítulo 4.

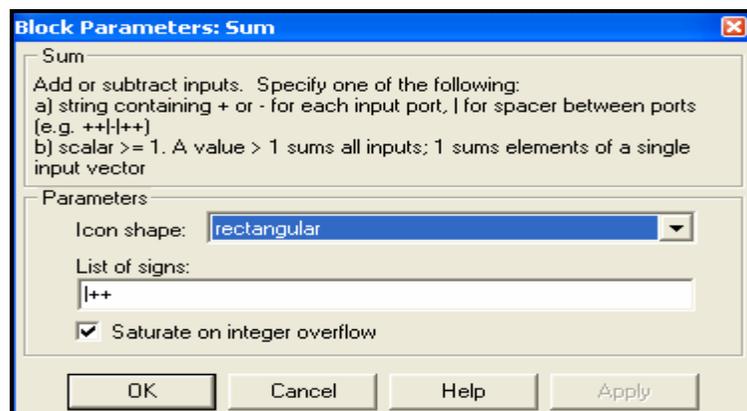
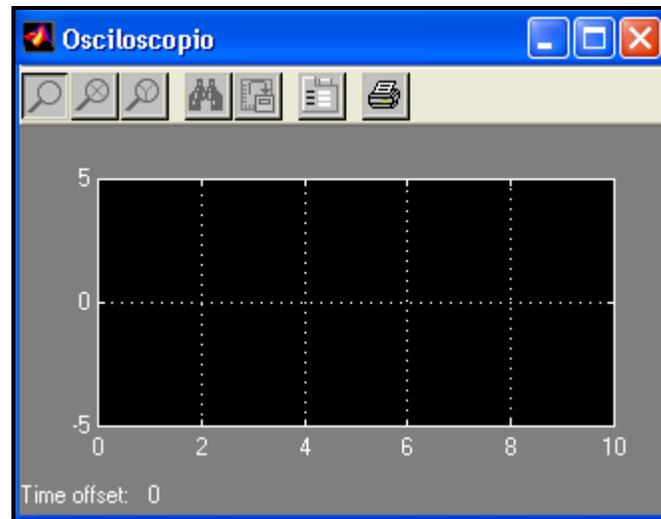


Fig. D.7 Ventana de datos de entrada del elemento sumador.

En la figura D.7 solo se tiene que introducir el signo de las entradas al sistema, en el caso de esta figura aparece como si las dos entradas fueran positivas.



**Fig. D.8** Gráfica generada por el osciloscopio.

La gráfica anterior es generada automáticamente por el osciloscopio que se coloca en los lugares en donde se quiere conocer la respuesta del sistema. Cuando se realizan las simulaciones correspondientes se generan los valores y se grafican automáticamente.

Por último es importante destacar que el simulador Matlab/Simulink puede resolver este sistema de control mediante diferentes métodos de resoluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias y también se le debe de fijar la tolerancia que el usuario desee. Para todas las simulaciones se va a utilizar el método desarrollado por Dormand-Price y una tolerancia de  $1 \times 10^{-3}$ . En la figura D.9 se muestra la ventana en donde se deben fijar los parámetros de simulación.

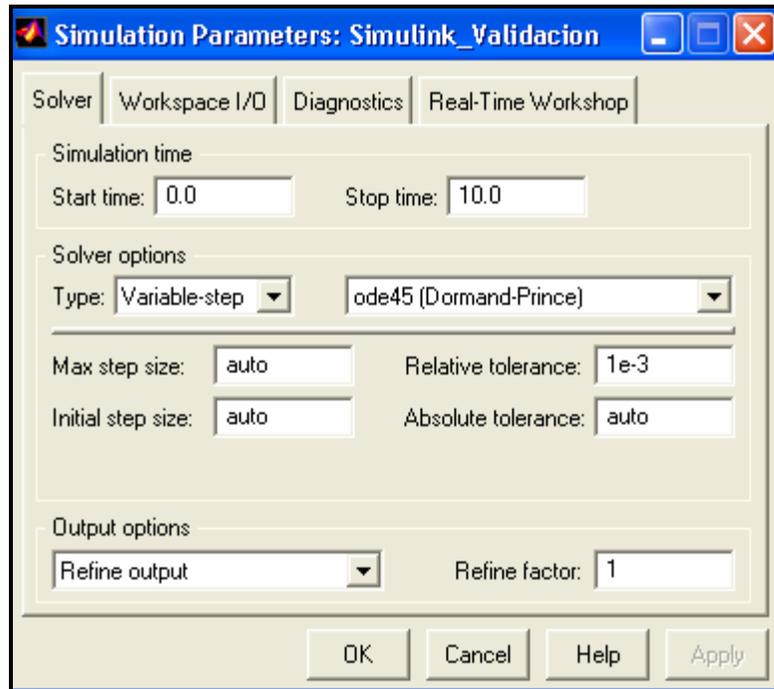


Fig. D.9 Ventana de parámetros de simulación.

## D.1 VENTAJAS DEL USO DEL SIMULADOR MATLAB/SIMULINK

- ✓ Es una aplicación diseñada específicamente para resolver sistemas de control.
- ✓ Permite una simulación rápida, ya que puede resolver el sistema de ecuaciones diferenciales generadas en el modelo. Si se deseara programar la resolución del modelo matemático tendría que hacerse con la ayuda de métodos numéricos, lo cual representa un trabajo largo y tedioso.
- ✓ Las respuestas son precisas y si el sistema es incoherente avisa en donde se localiza el error.
- ✓ Es un paquete muy amigable con el usuario y no se necesita ser un experto en la materia para poder usarlo.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arnold, K., Stewart, M.: "Designing Oil and Gas Production Systems: How to Size and Select Two-Phase Separators", World Oil (Nov. 1984) 73.
2. Arnold, K., Ferguson, P.: " Designing Tomorrow's Compact Separation Train", SPE 56644, Trabajo Presentado en Annual Technical Conference and Exhibition Held in Houston, Octubre 3-6, 1999.
3. Gomez, L., Mohan, R.: "State-of-the-Art Simulator for Field Applications of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators", SPE 56581, Trabajo Presentado en Annual Technical Conference and Exhibition Held in Houston, Octubre 3-6, 1999.
4. Gomez, L., Mohan, R., Shoham, O., Kouba, G.: " Enhanced Mechanistic Model and Field-Application Design of Gas/Liquid Cylindrical Cyclone Separators", SPE 49174, Trabajo Presentado en Annual Technical Conference and Exhibition Held in New Orleans, Septiembre 27-30, 1998.
5. Chirinos, W., Gomez, L., Wang, S., Mohan, R., Shoham, O., Kouba, G.: " Liquid Carry-Over in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Compact Separators", SPE 56582, Trabajo Presentado en Annual Technical Conference and Exhibition Held in Houston, Octubre 3-6, 1999.
6. Delgado, M., Lamanna, R., Uria, M.: "Instrumentación y Control", Departamento de Procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Abril, 1997.

- 
7. Phillips, C., Nagle, T.: "Digital Control Systems Analysis and Design", Editorial Prentice-Hall, Estados Unidos, 1984.
  8. Schmidt, Z., y colaboradores.: "Experimental Study of Two-Phase Slug Flow in a Pipeline-Riser Pipe System", University of Tulsa, 1978.
  9. Genceli, W.: "Simulation of Slug Catcher", Tesis de Maestría, University of Tulsa, 1982.
  10. Arpandi, I., Joshi, A., Shoham, O., Kouba, G.: "Hydrodynamics of Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators", SPE 30683, Trabajo Presentado en Annual Technical Conference and Exhibition Held in Dallas, Octubre 22-26, 1995.
  11. Marti, S., Erdal, F., Shoham, O., Shirazi, S., Kouba, G.: "Analysis of Gas Carry-Under in Gas-Liquid Cylindrical Cyclones", Trabajo Presentado en Hydrocyclones International Meeting, St. John College, Cambridge, Inglaterra, Abril 2-4, 1996.
  12. Motta, B., Erdal, F., Shirazi, S., Shoham, O., Rhyne, I.: "Simulation of Single-Phase and Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators", Trabajo Presentado en ASME Summer Meeting, Fluid Eng. Division, Vancouver, Canada, Junio 22-26, 1997.
  13. Kolpak, M.: "Passive Level Control in Two-Phase Separator", Comunicación Interna, Arco Exploración y Producción, 1994.
  14. Wang, S.: "Control System Design and Experimental Results", Tesis de Maestría, University of Tulsa, 1997.

- 
15. Mohan, R., Wang, S., Shoham, O., Kouba, G.: "Designs and Performance of Passive Control System for Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators", ASME, Journal Energy Resources Technology, Volumen 120, Marzo, 1998, páginas 49-55.
  16. Gomez, L.: "A State of the Art Simulator and Field Application Design of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators", Tesis de Maestría, University of Tulsa, 1998.
  17. Roy, S., Smith, C.: "Better Than Averaging Level Control", University of South Florida, 1995.
  18. Galichet, S., Foulloy, L., Chebre, M., Beauchene, J.: "Fuzzy Logic Control of a Floating Level in a Refinery Tank ", Trabajo Presentado en Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1994, páginas 1538-1542.
  19. Wang, S. y colaboradores: "Performance Improvement of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators Using Integrated Liquid Level and Pressure Control Systems", Trabajo Presentado en ASME, Journal of Energy Resources Technology, Diciembre, 2000, página 185.
  20. Wang, S. y colaboradores: "Control Systems Simulators for Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators", Trabajo Presentado en ASME Transactions, Journal of Energy Resources Technology, Diciembre, 2000, página 177.
  21. Erdal, F., Shirazi, S., Mantilla, I., Shoham, O.: "Computational Fluid Dynamics (CFD) Study of Bubble Carry-Under in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators", SPE 66500, Trabajo Presentado en Annual

- 
- Technical Conference and Exhibition Held in New Orleans, Septiembre 17-30, 1998.
22. Controladores Fisher.: "Product Catalog", USA, 1998
23. Ikoku, C.: "Natural Gas Production Engineering", Editorial John Wiley & Sons, Pennsylvania, USA, 1984.
24. McCain, W.: "The Properties of Petroleum Fluids", Segunda Edición, Editorial PennWell, Tulsa, Oklahoma, USA, 1989.
25. Weber, R.: "An Introduction to Process Dynamics and Control", Wiley Interscience, 1973.
26. Genceli, H., Kuenhold, K., Shoham, O., Brill, J.: "Dynamic Simulation of Slug Catcher Behavior", SPE 18235, Trabajo Presentado en Annual Technical Conference and Exhibition Held in Houston, Octubre 2-5, 1988.
27. Wang, S., Mohan, R., Shoham, O., Marrelli, J., Kouba, G.: "Optimal Control Strategy and Experimental Investigation of Gas/Liquid Compact Separators", SPE 63120, Trabajo Presentado en Annual Technical Conference and Exhibition Held in Dallas, Octubre 1-4, 2000.
28. Rondon, M.: "Dynamic Simulation of a Vertical Two-Phase Flow Separator", Tesis de Maestría, University of Tulsa, 1999.