

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

SITUACIÓN ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA DE

SEPARACIÓN COMPACTA GLCC

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO PETROLERO

PRESENTA:

GERMÁN COLÍN VALDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. JOSÉ ÁNGEL GÓMEZ CABRERA

CODIRECTOR DE TESIS:

M.I. ANA BERTHA GONZÁLEZ MORENO



MÉXICO, D.F., MAYO 2012

AGRADECIMIENTOS

Hay muchas cosas que podría agradecer y primero es a la vida misma, que me ha dado la oportunidad de presentar este trabajo con salud, energía, y alegría. En el transcurso de mi vida me he encontrado con personas e instituciones que me han apoyado a culminar con este objetivo, plasmándolos a continuación.

Empezaré agradeciendo a mis padres; Ventura Colín Hernández y Rocío Valdez Urbina, que desde que nací me han cuidado, amado, apoyado y siempre han creído en mí. No tengo con que agradecer todo lo que han hecho, sin embargo, creo que poco a poco verán rendir frutos por su dedicación y esfuerzo para que tanto yo como mis hermanos seamos hombres y mujeres exitosos y de bien. Este trabajo es un fruto que representa tiempo, esfuerzo y dedicación no sólo mío sino suyo también. Los amo.

A mis hermanos: Monse, Octavio, Dulce y Carlos que indudablemente me han dado cariño, inspiración, felicidad y hasta algunos enojos (jeje), agradeciéndoles además experiencias y enseñanzas que he aprendido estando con ustedes.

Quiero decir que en esta familia soy muy feliz y que estoy muy orgulloso de cada uno de ustedes. Los amo y quiero remarcar que lo que más me importa en esta vida son ustedes, mi familia.

Un agradecimiento especial es hacia la M.I. Ana Bertha González Moreno quién propuso este tema y dedico trabajo extra, interés y su tiempo, por lo cual le agradeceré hoy y siempre. Adicionalmente, le expreso mi admiración por ser una Ingeniera comprometida al 100% con su trabajo y por hacer las cosas de la mejor forma.

Al M.I. José Ángel Gómez Cabrera, por todo su apoyo, tiempo y enseñanzas que he aprendido de usted tanto en el aula como en fuera de ella, esperando llevar la carrera de Ingeniería Petrolera en la sangre como usted lo hace.

A mis sinodales, por sus aportaciones a mi tesis, así como por su compromiso conmigo y la carrera, y de los que tuve la oportunidad de tomar clase, por sus conocimientos transmitidos.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

A mis amigos de toda la vida: Daniel, Nelly y Nad, agradeciéndoles por muchos momentos de felicidad, amistad incondicional y comprensión. Recuerdo bastantes experiencias que hemos tenido juntos, por lo que afirmo que siempre contaré con ustedes como otro pilar en el cual me puedo apoyar. Muchas gracias por ser parte de mi vida.

A Andrés por tu gran ayuda con comentarios a mi tesis, por enseñarme a ser un mejor profesional y persona, por inspirarme, por las experiencias inolvidables, y tantas cosas más. Muchas gracias.

A mis amigos que mantuve y conocí en la carrera, los cuales hicieron que mi paso por la universidad fuera más agradable: Paco, Rosa, Magallanes, Uriel, Erika, Pau, Vero, Chris, Iván, Melisa, Itzel, Karenina, Bazán, Rodrigo, Sandra, Amparo, Katina, Caro, Dianita, Santiago, José Luis,...

Es importante mencionar a dos personas que estuvieron presentes en mi estancia por la universidad con su compañía, pláticas y hospitalidad que siempre me demostraron; Sra. Belén Torres y Sra. Rosa Martha Lenhe gracias, han sido muy lindas.

Agradezco al IMP y a las personas que conviví en esta institución: M.I. Ana Bertha, Ing. Jesús Rodríguez, M.I. Raúl Meza, Diana, Bere y Carlos les agradezco por su amabilidad, comentarios y agradable ambiente.

A mi país, a mi Universidad y en especial a la Facultad de Ingeniería por acogerme y darme una educación, más allá de una carrera. Y a todos los que directa o indirectamente participaron a lo largo de mi vida para que yo llegara a culminar esta meta.

Por mi raza hablará el espíritu.

“Aquel que deja de ser mejor, deja de ser bueno”

Oliver Cromwell

RESUMEN

El objetivo general de esta tesis es presentar la descripción de la tecnología de separación compacta GLCC (Gas-Liquid Cylindrical Cyclone, por sus siglas en inglés), los fenómenos físicos que se presentan en su interior, los modelos mecánicos de diseño, procesos de dimensionamiento y comportamiento de la operación, las mejores prácticas y las aplicaciones más importantes. Con lo anterior se busca reunir la información más relevante, actualizada y completa de esta tecnología, que no se cuenta de esta forma en la UNAM.

El desarrollo de esta tesis se presenta en cuatro capítulos iniciando con la configuración y principio de separación del separador compacto GLCC. En este capítulo se describe la tecnología contemplando su origen, configuración, características, fenómenos físicos, principio de separación y una breve descripción de la instrumentación y control que se puede implementar. En conjunto el objetivo de este capítulo es presentar de forma clara lo que es el separador GLCC y los aspectos con los que se trabajará en los siguientes capítulos.

En el capítulo dos, sobre el marco teórico del diseño, se documentan los modelos mecánicos usados en el diseño del separador GLCC, comenzando con los modelos mecánicos base, publicados inicialmente por Arpandi et al. (1996) que describen el comportamiento general del separador y que establecieron la forma de evaluación de las condiciones normales de operación. Continuando posteriormente con los nombrados, “avances de los modelos mecánicos” se documentan los modelos que vencen las limitaciones de los modelos mecánicos base y que adicionalmente presenta nuevos y más precisos modelos de predicción del comportamiento de los fluidos. Finalmente se concluye el capítulo con el papel que juega la simulación CFD (Computational Fluid Dynamic) en la tecnología de separación compacta GLCC, previendo así las herramientas de cálculo para el diseño.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

En el capítulo tres se presenta un proceso de diseño el cual lleve al separador GLCC al correcto funcionamiento de acuerdo a las características y condiciones de la producción a manejar, haciendo uso de los modelos mecánicos presentados en el capítulo 2 y criterios de diseño descritos en éste. En éste se proporcionan tres diagramas de flujo que buscan facilitar el proceso de diseño.

En el último capítulo, se describen algunas de las más importantes aplicaciones del separador compacto GLCC, incluyendo la descripción de pruebas realizadas de laboratorio y/o campo, las desarrolladas en México y las submarinas que por su novedad, dimensiones y potencial son importantes de describir. De este capítulo se pretende que los ingenieros petroleros conozcan las posibilidades de implementación y consideren el separador GLCC en sus aplicaciones de campo como una alternativa a los separadores convencionales.

Finalmente este trabajo termina con las conclusiones y recomendaciones de la tecnología de separación compacta GLCC.

LISTA DE FIGURAS

Figura I Tendencia de la implementación de separadores compactos GLCC.

Figura 1.1 Prototipo de campo de Chevron del separador GLCC.

Figura 1.2 Separador GLCC.

Figura 1.3 Sección de la entrada del separador compacto.

Figura 1.4 Boquilla del separador GLCC vista de planta, que corresponde a una ampliación de la sección de entrada.

Figura 1.5 Separador GLCC con entrada doble.

Figura 1.6 Separador GLCC señalando el diámetro (d) y longitud (L).

Figura 1.7 Esquema comparativo de dimensiones del separador GLCC y los separadores convencionales.

Figura 1.8 Separador compacto GLCC, instrumentado y con vista de planta de la entrada de los fluidos.

Figura 1.9 Fuerzas Actuantes sobre una Burbuja.

Figura 1.10 Formas de arrastre de líquido. a) Con flujo anular y b) Con flujo transicional-bache.

Figura 1.11 Condiciones de Operación con y sin Arrastre de líquido en el separador compacto GLCC.

Figura 1.12 Arrastre de gas en la corriente de salida del líquido.

Figura 1.13 Esquema de los patrones de flujo que ocurren en el cuerpo del separador con el nivel del líquido arriba de la entrada, lado izquierdo y abajo de la entrada, lado derecho.

Figura 1.14 Interfase gas-líquido de forma experimental y esquemáticamente.

Figura 1.15 Regiones de baches y gotas de líquido en la parte superior del separador GLCC.

Figura 1.16 Instrumentación usada en un lazo de medición multifásica con un separador compacto GLCC.

Figura 2.1 Nomenclatura y Parámetros Geométricos del Modelo Mecánico del separador GLCC.

Figura 2.2 Geometría de la Interfase Gas-Líquido.

Figura 2.3 Modelo de la Trayectoria de la Burbuja.

Figura 2.4 Predicción de la trayectoria de la burbuja.

Figura 2.5 Esquema para el análisis de la eficiencia de separación.

Figura 2.6 Predicción del colgamiento sin flujo neto de líquido para altas presiones.

Figura 2.6 Predicción del colgamiento sin flujo neto de líquido para altas presiones.

Figura 2.7 Sección de entrada del separador GLCC.

Figura 2.8 Sección de la entrada con flujo estratificado.

Figura 2.9 Vectores de velocidad en la entrada al cuerpo del separador GLCC.

Figura 2.10 Sección de entrada con flujo burbuja.

Figura 2.11 Sección de entrada con flujo bache.

Figura 2.12 Sección de entrada con flujo anular.

Figura 2.13 Esquema y nomenclatura del volumen de control rotando.

Figura 2.14 Sistema coordinado en el GLCC y los perfiles de velocidades típicos: axial y tangencial.

Figura 2.15 Distribución de las velocidades tangencial y axial.

Figura 2.16 Trayectoria de la burbuja y gas.

Figura 2.17 Ejemplos de trayectoria de dos burbujas para diferente posición inicial.

Figura 2.18 Configuración geométrica, mallado, del separador GLCC para la simulación CFD.

Figura 2.19 Vectores de velocidad en el separador GLCC obtenido con simulación CFD.

Figura 3.1 Diagrama de flujo del procedimiento general de diseño del separador GLCC.

Figura 3.2 Representación de las regiones del separador GLCC consideradas para el dimensionamiento.

Figura 3.3 Procedimiento de dimensionamiento del separador GLCC.

Figura 3.4 Procedimiento para determinar el comportamiento de la operación del separador GLCC.

Figura 3.5 Referencia para mediar alturas en el modelo del vórtice.

Figura 3.6 Interface del software GLCC V7.8.

Figura 4.1 Tendencia de la implementación de separadores compactos GLCC.

Figura 4.2 Lazo de Medición desarrollado por la Universidad de Tulsa.

Figura 4.3 Separador GLCC de prueba de campo en el campo Humble.

Figura 4.3 Separador GLCC de prueba de campo en el campo Humble.

Figura 4.4 Estación CEESI para prueba en campos de gas húmedo.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Figura 4.5 Separador GLCC de prueba para aplicación submarina.

Figura 4.6 Consideraciones de las pruebas de control dependiendo del nivel de líquido en el separador GLCC para aplicación submarina.

Figura 4.7 Medidor multifásico más grande del mundo ubicado en Minas, Indonesia.

Figura 4.8 Lazo de separación-medición en plataforma para producción de gas húmedo.

Figura 4.9 Eliminador de gas en plataforma.

Figura 4.10 Separador GLCC para eliminación de líquido de campos de gas húmedo.

Figura 4.11 Separadores GLCC para manejo de baches en Duri, Indonesia.

Figura 4.12 Separador GLCC como alternativa para el manejo de la producción en superficie.

Figura 4.13 GLCC-Accuflow: Diseño general, lado izquierdo e imagen de aplicación real en una plataforma de PEMEX, lado derecho.

Figura 4.14 Separador GLCC para aforo en tierra de aplicación en México.

Figura 4.15 Sistema de Separación y Bombeo (SBS, Separation and Boosting System) del Campo Perdido.

Figura 4.16 Separador Caisson (basado en la configuración del separador GLCC). a) Modelo del separador Caisson del Campo Perdido. b) Modelo del separador Caisson del Campo Parque Das Conchas.

Figura 4.17 Separador GLCC submarino del Campo Perdido.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Nomenclatura de la Instrumentación, de la Figura 1.4, de un lazo de medición multifásica.

Tabla 1.2 Parámetros de los lazos de control para un adecuado funcionamiento del separador GLCC.

Tabla 4.1 Características de los primeros prototipos de laboratorio del separador GLCC.

Tabla 4.2 Características del separador GLCC de prueba.

Tabla 4.3 Condiciones de operación de las pruebas hechas al separador GLCC en el campo Humble.

Tabla 4.4 Condiciones de diseño del separador GLCC para pruebas en laboratorio e implementación futura submarina de campo.

Tabla 4.5 Alternativa del manejo de la producción en superficie en el AIATG.

Tabla 4.6 Datos de aforos de pozos pertenecientes a una plataforma de PEMEX.

Tabla 4.7 Características del separador GLCC-Accuflow de aplicación en una plataforma de PEMEX.

Tabla 4.8 Configuración del separador GLCC desarrollado por personal del IMP.

Tabla 4.9 Condiciones de diseño del separador GLCC desarrollado por personal del IMP.

Tabla 4.10 Características del separador Caisson de los campos Perdido y Parque Das Conchas.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS	viii
ÍNDICE	ix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CONFIGURACIÓN Y PRINCIPIO DE SEPARACIÓN	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Configuración Física	5
1.2.1. Características	5
1.2.2. ¿Por qué compacto?	9
1.3. Principio de Separación	10
1.4. Fenómenos Físicos	12
1.4.1. Arrastre de Fluidos (líquido y gas)	12
1.4.2. Nivel de Líquido (NL)	15
1.4.3. Patrones de Flujo por Sección	16
1.4.4. Interfase Gas-Líquido	17
1.4.5. Colgamiento sin Flujo Neto de Líquido (H_{L0})	18
1.5. Instrumentación y Control	19
1.5.1. Estrategias de Control	21
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DEL DISEÑO	24
2.1. Base de los Modelos Mecanísticos	26
2.1.1. Nivel de Líquido (NL)	27
2.1.2. Interfase Gas-Líquido	29
2.1.3. Colgamiento sin Flujo Neto de Líquido (H_{L0})	31
2.1.4. Trayectoria de la Burbuja	32
2.1.5. Inicio de Flujo Niebla-Anular	39
2.2. Avances de Modelos Mecanísticos	40
2.2.1. Colgamiento sin Flujo Neto de Líquido (H_{L0}) Mejorado	41
2.2.2. Análisis en la Sección de Entrada y Boquilla	43
2.2.3. Forma del Vórtice	55
2.2.4. Trayectoria Unificada de una Partícula (Burbuja o Gota)	57
2.3. Simulación CFD	65
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	68
3.1. Criterios de Diseño	69
3.2. Procedimiento General de Diseño	72
3.2.1. Dimensionamiento: Configuración Física	74
3.2.2. Comportamiento de la Operación	82
3.2.3. Evaluación del Funcionamiento	87
3.3. Simulador GLCC V7.8	89

CAPÍTULO 4. APLICACIONES	90
4.1. Pruebas de Laboratorio y Campo	91
4.1.1. Primeros Prototipos de Laboratorio	91
4.1.2. Primeros Prototipos de Campo	92
4.1.3. Evolución de las Pruebas	93
4.2. Separadores GLCC de Mayor Implementación	98
4.2.1. Lazo de Separación-Medición Multifásico	98
4.2.2. Eliminador de Gas	99
4.2.3. Eliminador de Líquido de la Corriente de Gas Húmedo	100
4.2.4. Sistema de Manejo de Baches	101
4.3. En México	102
4.3.1. Alternativa del Manejo de la Producción en Superficie	102
4.3.2. Aforo de Pozos en Plataforma	104
4.3.3. Aforo de Pozos en Tierra	106
4.4. Submarinas	108
CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	116
APÉNDICES	122
A. Nomenclatura	122
B. Formulario de los Modelos Mecánicos	126
C. Glosario	132

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera el uso de separadores es importante para el manejo de la producción de hidrocarburos, ya que se requiere separar los fluidos de los pozos petroleros de acuerdo a sus fases para venta, transporte, re-inyección y almacenamiento (Redonda Godoy, 2008). Los separadores más usados hoy en día son aquellos que se basan en el asentamiento por fuerza de gravedad, separadores convencionales, los cuales son clasificados como verticales, horizontales y esféricos, y que pueden ser bifásicos o trifásicos. La tendencia desde hace ya algunos años es hacia separadores eficientes que funcionen a mayores gravedades inducidas y aprovechen la diferencia de densidades de los fluidos, como los separadores centrífugos (conocidos como rotatorios, de vórtice, hidrociclónicos o ciclónicos) con el objetivo de reducir tres factores de los separadores convencionales que son las dimensiones, peso y costos (Nicolas Lopez, 2005).

El separador cilíndrico ciclónico gas-líquido, GLCC por sus siglas en inglés de Gas-Liquid Cylindrical Cyclone, es un separador que se encuentra en la categoría de separadores centrífugos, con características que lo describen como simple, compacto, fácil de operar e instalar, liviano, eficiente y de bajos costos de operación e inversión en comparación de los separadores convencionales, que lo hacen muy atractivo, especialmente para aplicaciones costa afuera en dónde estas características pueden ser factores clave para la selección de equipo (Kouba, Shoham, & Shirazi, 1995).

El llamado “separador compacto GLCC” surgió a mediados de la década de 1990 y a la fecha cuenta con más de 4000¹ aplicaciones de campo y como se puede apreciar en la figura I comprueba el éxito, la eficiencia y la tendencia ascendente del uso de los separadores cilíndricos ciclónicos gas-líquido (Kouba et al., 2006).

¹ De www.tustp.org, se accedió en septiembre del 2011.



Figura I Tendencia de la implementación de separadores compactos GLCC (modificada de Kouba G., et al., 2006).

En la revisión de la literatura que se encuentra en la UNAM sobre la tecnología de separación GLCC, se encontraron dos tesis, una de maestría y una de licenciatura, así como un artículo publicado en la revista Ingeniería, Investigación y Tecnología de la Facultad de Ingeniería desarrollado por personal del IMP. En la tesis de maestría (Rojas Pérez, 2005) se desarrollaron modelos de control dinámicos considerando todos los controladores comerciales para el funcionamiento adecuado del separador GLCC para evitar el problema del arrastre de fluidos. En el artículo (Godoy-Alcántar et al., 2008) se enfoca a estrategias de control y presenta su implementación para aforo de pozos. Y finalmente en la tesis de licenciatura (Morales Cruz & Ríos Aguilar, 2010) se documentó una parte de lo que aquí se denominó “Base de los Modelos Mecánicos”, así como conceptos básicos que son de ayuda para aquellos que no están relacionados con el tema.

A diferencia de los trabajos descritos, en general este trabajo busca reunir información actualizada del separador GLCC, en la que incluya la descripción de la tecnología, inicios, futuro, modelos de descripción del comportamiento del flujo, procedimientos de diseño, mejores prácticas, evaluación de su funcionamiento y aplicaciones, brindando así un panorama de la “Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC”.

CAPÍTULO 1. CONFIGURACIÓN Y PRINCIPIO DE SEPARACIÓN

1.1. Antecedentes

En 1994 se estableció un programa de investigación y desarrollo de tecnología de separación compacta ciclónica entre la Universidad de Tulsa y un grupo de compañías patrocinadoras, PEMEX incluido en este grupo, con el fin de reducir factores de los separadores convencionales como las dimensiones, costos y peso que pueden ser críticos, por ejemplo en instalaciones costa afuera. El programa tiene el nombre de Tulsa University Separation Technology Project (TUSTP) el cual incluye el separador cilíndrico ciclónico gas-líquido, GLCC por sus siglas en inglés (Gas-Liquid Cylindrical Cyclone) y del que la Universidad de Tulsa tiene la patente desde ese mismo año (Kouba, Wang, Gomez, Mohan, & Shoham, 2006).

Esta tecnología de separación ciclónica es considerada de diseño simple y de operación sencilla, la cual anteriormente al proyecto TUSTP era usada para separar fases líquido-líquido, sólido-líquido y gas-sólido, con uso limitado en separación gas-líquido hasta mediados de la década de 1990 debido a la falta de estudios de predicción del funcionamiento bajo diferentes condiciones (Kouba & Shoham, 1996).

Los primeros estudios del separador compacto GLCC los realizó la compañía Chevron, durante los primeros años en que inició el programa TUSTP, con el fin de desarrollar un sistema lazo de medición multifásico, construyendo e instalando un prototipo en el campo Fox Deese Springer, al sur de Oklahoma y que se puede apreciar en la figura 1.1 (Kouba, Shoham, & Shirazi, 1995).



Figura 1.1 Prototipo de campo de Chevron del separador GLCC (Kouba et al. 1995).

El separador compacto GLCC a través del programa TUSTP ha sido investigado, desarrollado, implementado y documentado desde 1995 con la primera publicación sobre el diseño y funcionamiento del separador GLCC presentada por Kouba y colaboradores.

Las etapas claves de desarrollo del separador GLCC fueron la concepción de la idea, construcción y operación de un laboratorio de pruebas de prototipos, pruebas de campo y finalmente la implementación en varios campos. Con las instalaciones del separador compacto GLCC alrededor del mundo y su desempeño, éste ha ganado aceptación y confianza, por lo que empezó a ser considerado para aplicaciones costa afuera y submarinas (Kouba et al., 2006).

1.2. Configuración Física

El separador compacto GLCC tiene una configuración física simple y consiste principalmente en cuatro secciones: la entrada tangencial inclinada descendente, una tubería instalada verticalmente (cuerpo del separador) y dos líneas de descarga, una en la parte inferior y otra en la parte superior, para la salida del líquido y el gas, respectivamente, que se puede apreciar en la figura 1.2. El separador no contiene partes móviles ni dispositivos internos (Joshi, 1995).

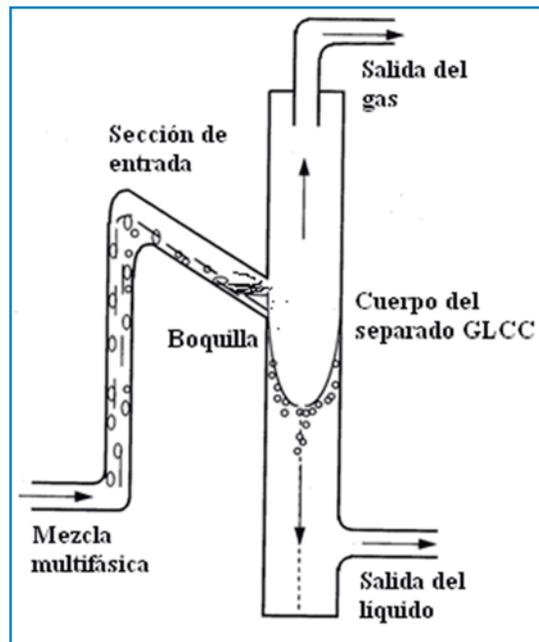


Figura 1.2 Separador GLCC (modificada de Joshi A.R., 1995).

1.2.1. Características

A continuación se presentan algunas características del separador GLCC y la descripción de cómo influyen en el proceso de separación de las fases:

Sección de Entrada: Esta sección lleva la corriente de los pozos hacia el cuerpo del separador a través de una tubería inclinada que termina en una boquilla con entrada tangencial. Esta sección de entrada determina la distribución del gas y el líquido, así como las velocidades tangenciales iniciales en la entrada del separador GLCC, que son variables que influyen en gran medida en el funcionamiento de éste.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Una consideración importante de la entrada es la inclinación, la cual amplía las condiciones normales de operación sin arrastre de fluidos (fenómeno no deseado) a través de dos mecanismos: el primero promueve la estratificación del flujo, lo que proporciona una pre-separación, mientras que el segundo ocasiona una corriente de líquido en espiral descendente por abajo de la entrada previniendo que el líquido fluya hacia la parte superior, como se observa en la figura 1.3, lo que mejora el funcionamiento del separador GLCC (Kouba & Shoham, 1996).

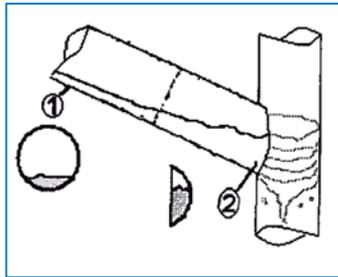


Figura 1.3 Sección de la entrada del separador compacto GLCC (Gómez, 1998).

Boquilla de Entrada: Éste es el último elemento de la entrada, como se muestra en la figura 1.4, e influye en la distribución de los fluidos y en las velocidades tangenciales iniciales a la entrada en el cuerpo del separador GLCC. Las configuraciones probadas de boquillas en laboratorio fueron de tipo rectangular, diámetro de tubería reducido y de placa insertada, en la que esta última mostró un mejor funcionamiento ya que ampliaba las condiciones de operación del separador, además que esta boquilla era capaz de mantener el flujo estratificado desde la entrada hasta que el flujo alcanzaba el cuerpo del separador (Wang, 1997 en Gómez, 1998).

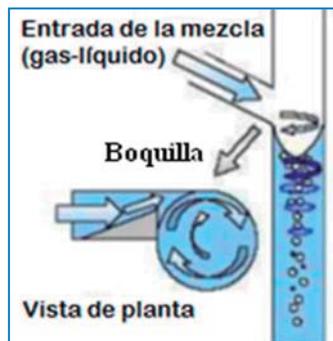


Figura 1.4 Boquilla del separador GLCC vista de planta, que corresponde a una ampliación de la sección de entrada (modificada de Swaraoop Kolla, 2007).

Entrada Doble: La configuración de este tipo de entradas podrían ser diversas y una propuesta que se realizó fue con entradas diametralmente opuestas, que se sugería mejoraría la simetría y estabilidad del núcleo de gas que se forma, lo que por pruebas posteriores demostró no tener mejoras significativas (Erdal & Shirazi, 2002).

La configuración con entrada doble que se utiliza es en paralelo a diferentes alturas, como se observa en la figura 1.5, lo que ha demostrado buenos resultados ya que proporciona una pre-separación del flujo multifásico con una corriente rica en líquidos (entrada más baja, #1) y una corriente con alto porcentaje de gas (entrada más alta; #2), lo que reduce la sensibilidad del nivel de líquido.

Las pruebas de la entrada doble respecto a la entrada simple muestran que esta configuración es recomendable en sistemas dominados por líquido, como en el flujo bache, y que de implementarse en sistemas dominados por la fase gaseosa, como en el flujo anular, no presenta mejoras significativas (Movafaghian, 1997).

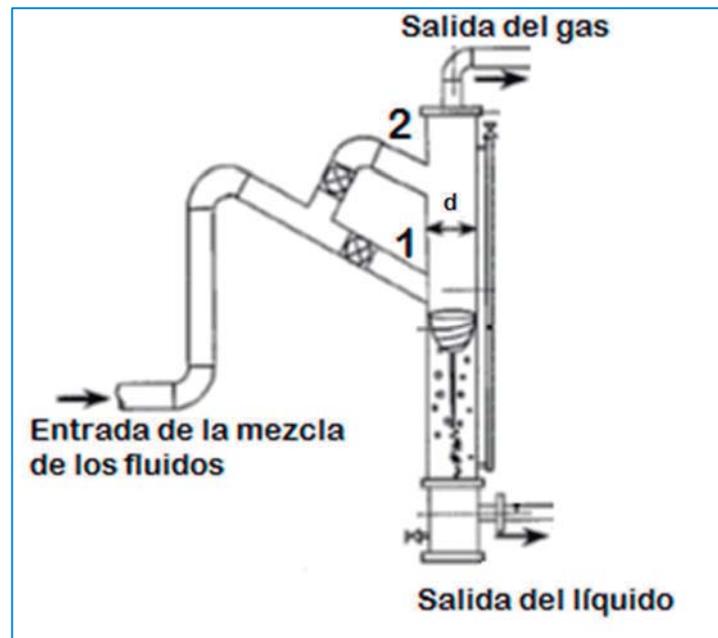


Figura 1.5 Separador GLCC con entrada doble (Modificada de Chirinos et al., 2000).

Relación Longitud-Diámetro (L/d): Como se puede intuir acertadamente es la relación de la longitud (L) con el diámetro (d) del separador y corresponde físicamente a las dimensiones del cuerpo del separador GLCC, ver figura 1.6. Esta característica influye en el funcionamiento, en los costos y en el mantenimiento del mismo. Para un cierto diámetro, la longitud por arriba de la entrada proporciona la capacidad de manejar líquido, mientras que la longitud por abajo de la entrada determina el tiempo de retención para la separación de las burbujas de gas del líquido.

La influencia de la relación (L/d) en el funcionamiento del separador GLCC se debe a que las fuerzas que actúan sobre los fluidos, como la centrífuga es inversamente proporcional al diámetro, es decir, que esta fuerza será mayor para un diámetro menor y por el contrario, se tendrá una menor magnitud entre mayor sea el diámetro. Por lo que se comprueba la importancia de estas dimensiones que participan en la eficiencia de separación (Shoham & Kouba, 1998). Esta característica nos proporciona las dimensiones del separador GLCC, que se determina con los modelos mecánicos presentados en el siguiente capítulo, siguiendo los procedimientos descritos en el capítulo 3 de diseño.

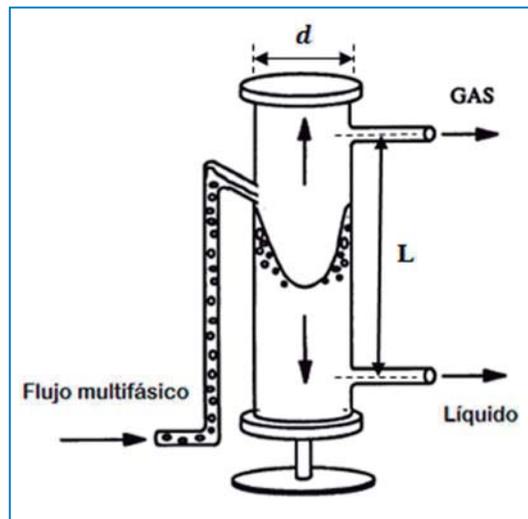


Figura 1.6 Separador GLCC señalando el diámetro (d) y longitud (L) (Kouba et al., 1995).

1.2.2. ¿Por qué compacto?

Es muy común encontrar que al separador GLCC se le nombre como “separador compacto GLCC” por lo que respuesta al título de esta sección, es respondida con una comparación de dimensiones y peso del separador GLCC respecto a los separadores convencionales verticales y horizontales. La comparación fue realizada por Kouba y Shoham (1997 en Gómez, 1998) en una aplicación de campo del separador GLCC para condiciones de gastos de líquido de 200 000 [bpd], gasto de gas de 70 [mmpcd] y una presión de operación de 100 [lb/pg² man] demostrando una reducción significativa de estos dos aspectos.

Las dimensiones del separador GLCC (diámetro-longitud) fueron de 5x20 [pies], mientras que de haberse usado separadores convencionales, las dimensiones estimadas serían de 9x35 [pies] para el separador vertical y 19x75 [pies] para el separador horizontal, lo que representa aproximadamente la mitad de las dimensiones del separador vertical y una cuarta parte del separador horizontal. La comparación esquemática se puede apreciar en la figura 1.7. En la comparación respecto al peso, se supuso llenar los separadores con agua hasta la mitad su capacidad y la reducción en carga del separador GLCC resulto en 1/8 respecto al vertical y en 1/64 del peso del separador horizontal.

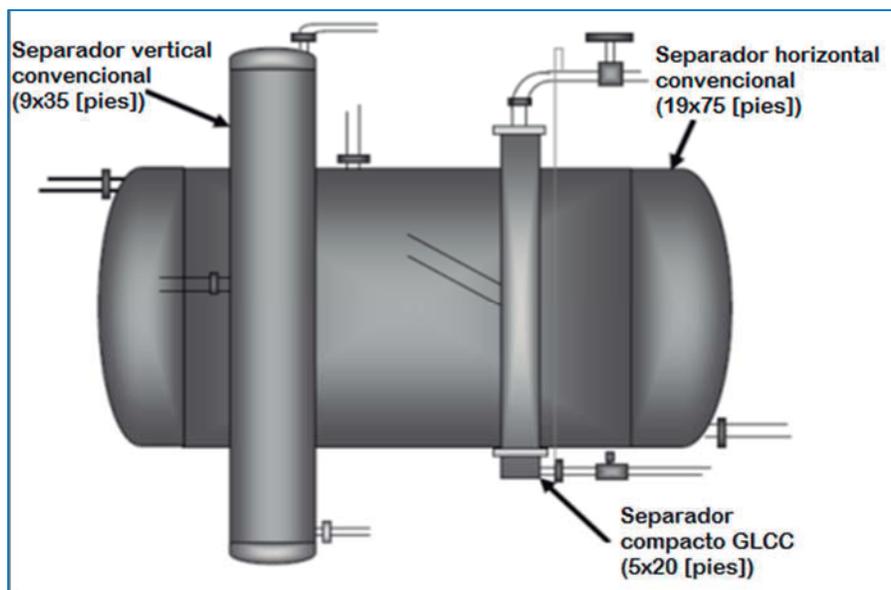


Figura 1.7 Esquema comparativo de dimensiones del separador GLCC y los separadores convencionales (modificada de Swaraoop Kolla, 2007).

1.3. Principio de Separación

El principio de separación gas-líquido es principalmente la provocación de una fuerza centrífuga que actúe sobre los fluidos, lo que se logra mediante una entrada tangencial y acelerada de estos, que ocurre justo antes de entrar al cuerpo del separador, es decir, en la boquilla. Lo anterior crea un flujo ciclónico a velocidades suficientemente altas para llevar la fase más densa (líquido) hacia la pared del cilindro y la menos densa (gas) hacia el centro (Vernon Smith, 1992). La representación de este principio se puede observar en la figura 1.8.

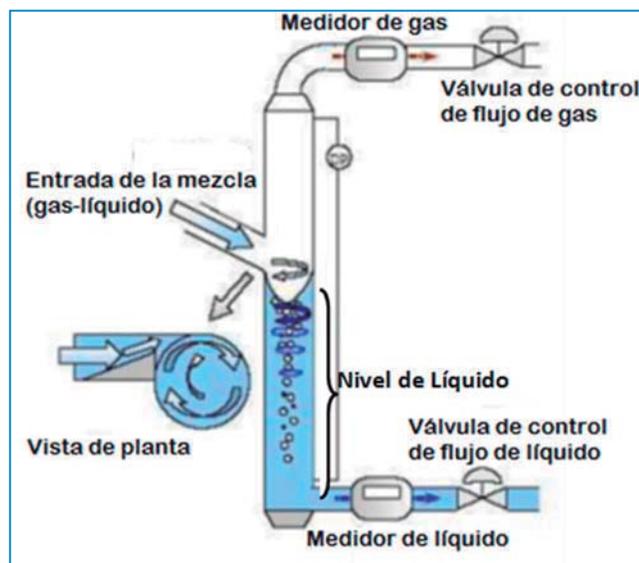


Figura 1.8 Separador compacto GLCC, instrumentado y con vista de planta de la entrada de los fluidos (modificada de Swaraoop Kolla, 2007).

“La intensidad del vórtice y magnitud de la fuerza centrífuga dependen principalmente de la velocidad tangencial de entrada y del diámetro del separador, por lo anterior la geometría del separador tiene un papel importante en la dinámica de la separación de fases” (Nicolas Lopez, 2005).

El flujo ciclónico se refiere al movimiento circular de las fases, las cuales experimentan una combinación de fuerzas, además de la centrífuga, como la de flotación, gravitacional, centrípeta y de arrastre.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

En el análisis de fuerzas que actúan sobre una burbuja que se encuentre en un medio líquido girando, las principales fuerzas y direcciones que actúan en la burbuja son centrípeta, de arrastre y de flotación, tal como se aprecia en la figura 1.9 en la que la fuerza de flotación se dirige hacia arriba (F_{zb}), la de arrastre hacia abajo y a la derecha (F_{rD} y F_{zD}), y finalmente la centrípeta (F_{rC}) hacia el centro del cilindro (Shoham & Kouba, 1998).

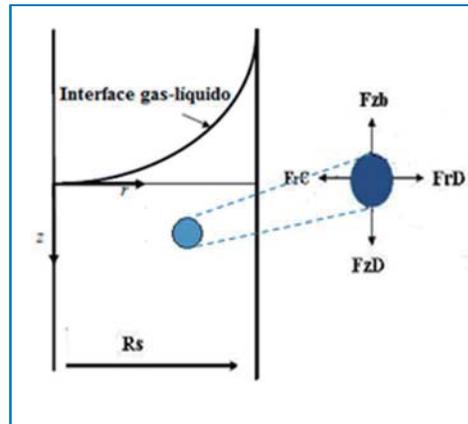


Figura 1.9 Fuerzas Actuantes sobre una Burbuja (modificada de Marti et al., 1996).

Para el caso del análisis de fuerzas que actúan en una gota que se encuentre en un medio gaseoso, como sería en la parte superior del separador GLCC, las fuerzas que experimentaría esta gota serán principalmente de arrastre, centrífuga y gravedad con direcciones hacia arriba e izquierda, derecha y abajo, respectivamente.

Generalmente la velocidad necesaria para la separación centrífuga varía de 40 a 300 [pies/s] (Vernon Smith, 1992) lo que reduce al mínimo los tiempos de retención. La velocidad tangencial del líquido recomendada en el separador GLCC es de 20 pies/s (Gómez, 1998) y aunque menor a las más usuales es reportada como la óptima para la separación. Las velocidades de los fluidos y en consecuencia el casi nulo tiempo de residencia de los fluidos explica por qué el separador gas-líquido cilíndrico ciclónico (GLCC) disminuye las dimensiones de los separadores convencionales (Rojas Pérez, 2005).

La eficiencia de separación del separador GLCC será adecuada dependiendo del objetivo buscado, ejemplos de esto son para estabilizar la fase gaseosa, para controlar la relación gas-aceite y/o transporte.

1.4. Fenómenos Físicos

A continuación se definen los fenómenos físicos fundamentales presentes en el separador compacto GLCC, que son considerados para diseño y predicción del funcionamiento de éste. Estos fenómenos físicos son el arrastre de fluidos (gas y líquido), nivel de líquido (NL), patrones de flujo en las diferentes secciones del separador, interfase gas-líquido y colgamiento sin flujo neto de líquido (H_{L0}).

1.4.1. Arrastre de Fluidos (líquido y gas)

El diseño y funcionamiento del separador compacto GLCC se encuentra limitado por dos fenómenos no deseados que son el arrastre de líquido en la corriente de salida del gas y el arrastre de gas en la corriente de salida del líquido, los cuales son importantes de predecir debido a que reduce la eficiencia de separación y/o puede reducir la precisión, funcionamiento o hasta dañar equipo que se encuentre corriente abajo. Estos dos fenómenos se busca predecirlos con los modelos mecanísticos.

Dos conceptos relacionados a este tema y que se aplicaran en los siguientes capítulos son la velocidad crítica del gas y del líquido, en la que ésta última está definida como la velocidad del líquido límite a la cual un ligero incremento en su velocidad producirá el inicio de arrastre de gas en la corriente de salida de líquido y de forma similar la velocidad crítica de gas, es la velocidad del gas límite en la que un ligero incremento, iniciará arrastre de líquido en la corriente de salida del gas.

Arrastre de Líquido

El arrastre de líquido en la salida del gas ocurre por altos gastos de los fluidos o por un mal diseño. Las dos principales formas en que se presenta este fenómeno son como gotas o pequeños baches de líquido (figura 1.10). El primero se presenta con altos gastos de gas y bajos de líquido, características del flujo anular-niebla (a). El segundo tipo ocurre con altos gastos de líquido y bajos de gas, características del flujo transicional-bache (b), en dónde pequeños baches suben y bajan en la parte superior del separador GLCC y el líquido en la salida del gas se presenta en acumulaciones de líquido, muchas veces continuas (Swaraoop Kolla, 2007).

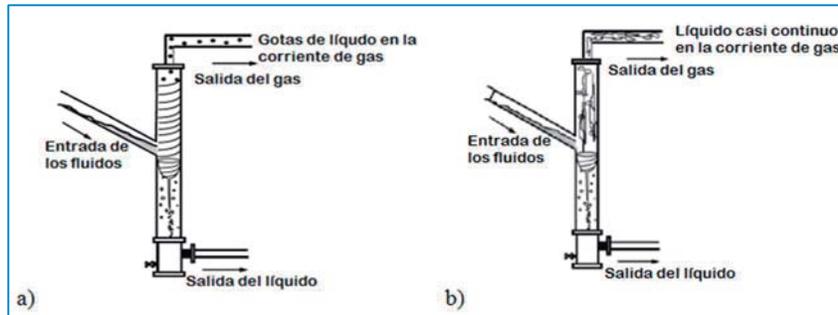


Figura 1.10 Formas de arrastre de líquido (Swaroop Kolla, 2007). a) Con flujo anular y b) Con flujo transicional-bache.

El arrastre de líquido en la corriente de salida del gas tiene mayor importancia en la eficiencia de separación debido a la necesidad de recuperar la mayor cantidad de líquidos livianos, siendo éstos más valiosos en el mercado.

La forma de representar las condiciones en las que se presenta el arrastre de líquido es graficando los gastos tanto de líquido como de gas o bien las velocidades superficiales del líquido y del gas (la forma más común) en las cuales se inicia el arrastre de líquido, formando la curva gruesa azul, como se muestra en la figura 1.11.

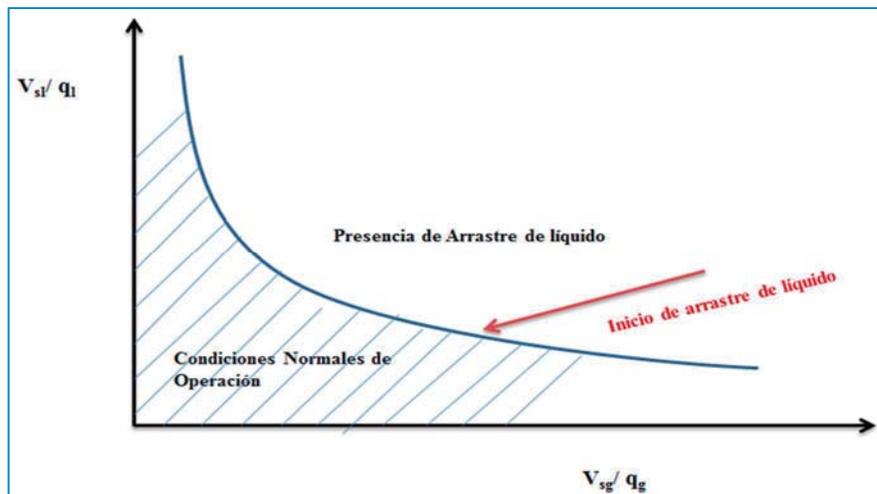


Figura 1.11 Condiciones de Operación con y sin Arrastre de líquido en el separador compacto GLCC.

Como se puede apreciar en el gráfico, se dividen las condiciones normales de operación sin arrastre de líquido, en las que debe operar el separador GLCC, además de ser la forma de evaluar su correcto funcionamiento (región con líneas inclinadas), de las condiciones con arrastre de líquido, parte superior y forma no deseada de operación (Swaroop Kolla, 2007).

Arrastre de Gas

El arrastre de gas en la salida del líquido es el otro fenómeno no deseado en la operación del separador GLCC, que como se puede apreciar en la figura 1.12, es el flujo de burbujas en la corriente de salida del líquido. Los factores que pueden influir para que se presente este fenómeno son la longitud por abajo de la entrada, el diámetro de la entrada, el patrón de flujo presente y la intensidad de la fuerza centrífuga de separación.

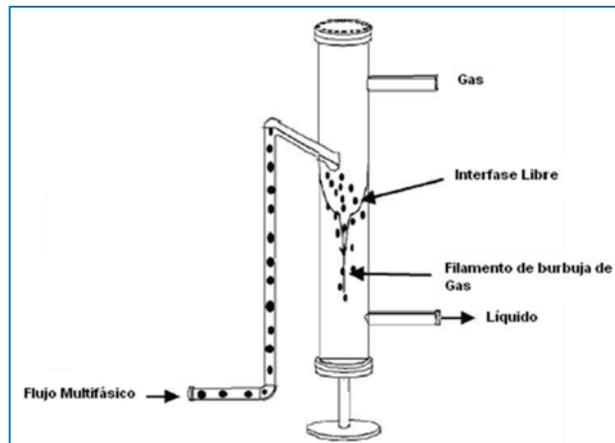


Figura 1.12 Arrastre de gas en la corriente de salida del líquido (Shoham & Kouba, 1998).

Se ha detectado que la presencia de este fenómeno se debe a tres mecanismos: el primero se presenta cuando la trayectoria de las pequeñas burbujas cercanas al vórtice impiden que otras burbujas más alejadas se unan al núcleo de gas (estudiado en el análisis de la trayectoria de la burbuja), el segundo sucede cuando se tiene inestabilidad del ciclón produciendo un movimiento de oleadas de líquido, ocasionalmente rompiendo el filamento del gas cerca de la salida del líquido y el tercero ocurre cuando aumenta el líquido repentinamente (como baches de líquido) provocando que grandes acumulaciones de burbujas queden atrapadas en el líquido dificultando su integración al núcleo de gas y por lo tanto son producidas en la corriente de salida del líquido.

1.4.2. Nivel de Líquido (NL)

Este concepto se refiere a la cantidad (o columna) de líquido que se encuentra en el cuerpo del separador GLCC, el cual en operación, se puede conocer con un indicador de nivel visual (mirilla) o en cuestiones de diseño o indirectamente, mediante un balance de presión desde la entrada hasta las salidas de los fluidos, siendo este último válido cuando el separador está en una configuración de lazo (recombinando las salidas) y obtenido de modelos mecánicos descritos en el siguiente capítulo.

La importancia del nivel de líquido es debido a que es un factor crítico para determinar el arrastre de líquido o gas y por lo tanto para la correcta operación del separador GLCC debido a que si éste se encuentra muy bajo, cerca de la salida del líquido, muy probablemente se presentará arrastre de gas en la salida del líquido y si es muy alto, causará arrastre de líquido en la salida del gas. Para una correcta operación, el nivel de líquido debe mantenerse en un rango adecuado por abajo de la entrada de los fluidos (Arpandi et al., 1996).

La entrada tangencial de la corriente de líquido al cuerpo del separador causa un giro alrededor de la circunferencia interna del cuerpo del separador GLCC a lo largo de una distancia que mantendrá un alto momento angular, generando el ciclón, por arriba del nivel de líquido. Si esta distancia se incrementa más allá, la fricción causará un deterioro en la velocidad tangencial del líquido y por otro lado si la distancia es muy pequeña el nivel de líquido se encontrará enfrente de la entrada, forzando al gas a fluir a través del líquido lo que aumenta la probabilidad de arrastrar líquido hacia la salida del gas (Kouba & Shoham, 1996). Ver figura 1.13.

1.4.3. Patrones de Flujo por Sección

Las dificultades que se presentan para desarrollar herramientas que permitan predecir el funcionamiento del separador y su correcto diseño se deben a la complejidad del flujo que se puede presentar en las diferentes secciones del separador GLCC. Los patrones de flujo en la sección de entrada que generalmente se pueden presentar son tipo estratificado, bache, burbuja y niebla; en el cuerpo del separador arriba de la entrada se puede tener flujo tipo burbuja, bache/transicional, niebla y anular; abajo de la entrada el flujo se presenta como un vórtice de líquido con un filamento (núcleo) de gas y finalmente en las secciones de salida, es deseado un flujo tipo monofásico ya sea de gas o de líquido, según sea el caso (Gómez L. , 1998).

El esquema que representa los patrones de flujo en el cuerpo del separador se presentan en la figura 1.13 que corresponden a un nivel de líquido arriba de la entrada (izquierda) y abajo de la entrada (derecha) presentando diferentes comportamientos del flujo en el cuerpo del separador.

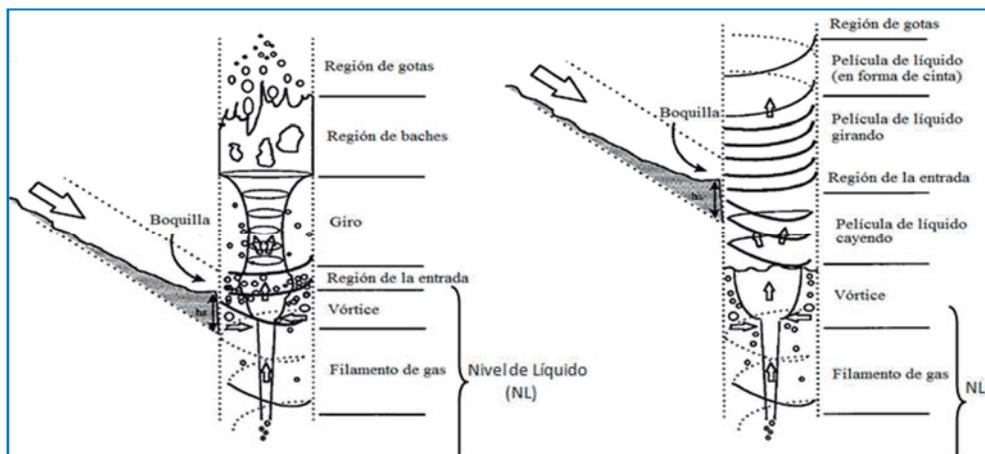


Figura 1.13 Esquema de los patrones de flujo formados en el cuerpo del separador con el nivel del líquido arriba de la entrada (lado izquierdo) y abajo de la entrada, lado derecho (modificada de Movafghian, 1997).

El caso del nivel de líquido arriba de la entrada (lado izquierdo) se presenta con altos gastos de líquido y gas, en la que la fase gaseosa es separada en la parte superior del ciclón, en la que gira y avanza hacia arriba atravesando la columna de líquido, presente arriba de la entrada.

Para condiciones de bajo gasto de líquido y alto de gas, el nivel de líquido se encuentra abajo de la entrada, en donde el líquido se desliza pegado en la pared en forma de una película que se va haciendo más delgada y pudiendo arrastrar en ciertos casos pequeñas gotas de líquido por la corriente de gas.

La forma del vórtice (ciclón) y su estabilidad son altamente dependientes de la distancia entre la entrada y el nivel de líquido, por lo que se recomienda sea equivalente a una relación (L/d) . El filamento de gas va de la base del vórtice a cierto punto antes de la salida del líquido. La fase de gas, por otro lado es separada fácilmente y en su mayoría en la región de la entrada y se mueve hacia la salida del gas.

1.4.4. Interfase Gas-Líquido

Este fenómeno se presenta en el cuerpo del separador GLCC debido a que el flujo de líquido y de gas entran tangencialmente y a velocidades relativamente altas, lo que genera un vórtice con una forma parabólica, como se puede observar en la figura 1.14, que muestra esta interfase gas-líquido tanto experimentalmente, lado izquierdo, como esquemáticamente, lado derecho.

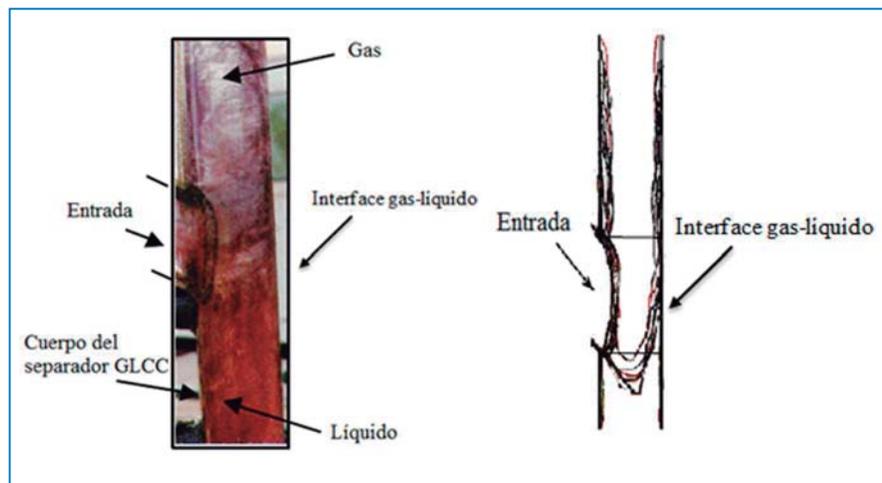


Figura 1.14 Interfase gas-líquido de forma experimental y esquemáticamente (modificada de Erdal et al., 1998).

1.4.5. Colgamiento sin Flujo Neto de Líquido (H_{L0})

Este fenómeno de colgamiento sin flujo neto de líquido se presenta previo a que inicie el arrastre de líquido y representa flujo tanto de gas como de líquido en la parte superior del cuerpo del separador pero dónde sólo es producida la fase gaseosa, es decir, no presenta flujo de líquido en la corriente de salida del gas (arrastre de líquido).

El líquido presente en la parte superior ocurre en forma de baches y gotas de líquido que pueden estar ascendiendo por las condiciones de flujo y/u operación, y descendiendo por acción de la fuerza de gravedad. Con lo anterior mencionado hay que considerar que con un aumento ligero de la velocidad del gas, podría ocasionar el inicio de arrastre de líquido (Arpardi, 1995).

El colgamiento sin flujo neto de líquido se presenta en dos formas, una con bajos gastos de gas y altos de líquido formando un flujo bache/transicional en toda la parte superior del separador GLCC y la otra con gastos de gas mayores y relativamente bajos de líquido desarrollando dos regiones en la parte superior: bache/transicional en la parte baja y de gotas en la parte alta, como se observa en la figura 1.15. Bajo estas últimas circunstancias, las grandes cantidades de gas atraviesan el líquido (región bache/transicional) que se encuentra arriba de la entrada, por lo que forman y arrastran gotas de líquido hacia arriba, en dónde la distancia que las gotas serán arrastradas dependerá de su tamaño, velocidad inicial y velocidad del gas.

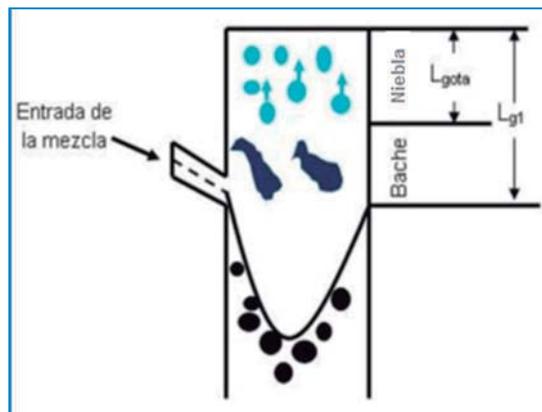


Figura 1.15 Regiones de baches y gotas de líquido en la parte superior del separador GLCC (Morales Cruz & Ríos Aguilar, 2010).

La importancia de este fenómeno es que representa condiciones antes de que inicie el arrastre de líquido, por lo que predecir las regiones de éste, como la región de gotas y consecuentemente la región de baches lleva a determinar las condiciones normales sin arrastre de líquido.

1.5. Instrumentación y Control

El campo de la instrumentación y control es muy amplio y en esta tesis se considera como una herramienta para la operación del separador compacto GLCC que busca mejorar las condiciones de operación del mismo, restringiéndose a las diferentes estrategias de control, así que no se profundizará en muchos aspectos y se aborda como una característica importante y necesaria para la medición de parámetros, seguridad y hacer más eficiente el separador llevándolo a condiciones más amplias de operación.

De forma general la instrumentación usada en el separador compacto GLCC se compone de dispositivos como; válvulas de control, válvula de alivio tipo check (por seguridad), medidor de nivel (mirilla), transductores, controladores, medidores de presión, temperatura y flujo, sensores y en casos experimentales o de pruebas, bombas y compresores. A continuación se muestra un esquema en la figura 1.16 que representa la instrumentación y en la tabla 1.1 la nomenclatura de un lazo (salidas re combinadas) de medición multifásica para aforo de pozos, usando un separador compacto GLCC con entrada doble.

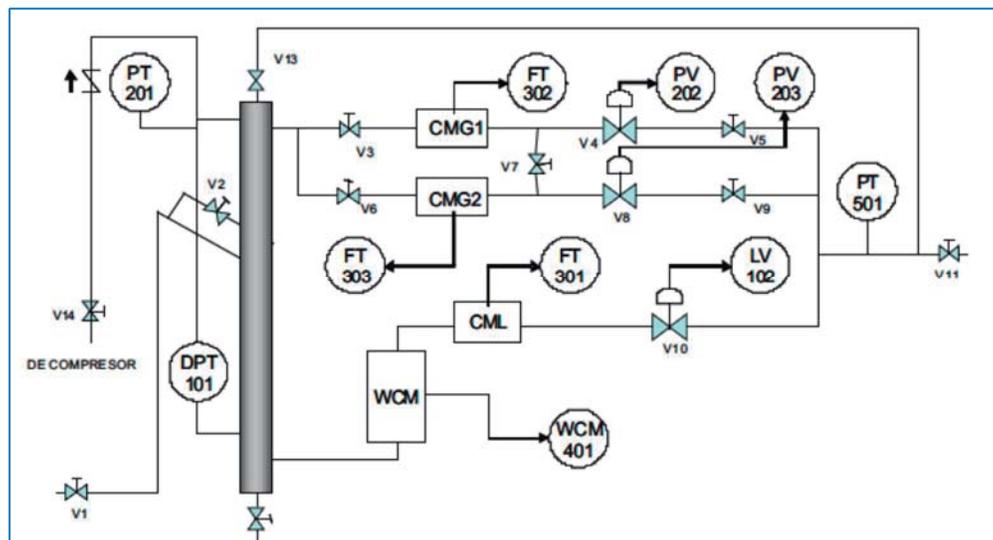


Figura 1.16 Instrumentación usada en un lazo de medición multifásica con un separador GLCC (Godoy A., et al., 2008).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Instrumento	Tipo de Instrumento	Función y lecturas proporcionadas
PT-201	Medidor de presión estática	Presión de separación en el GLCC.
DPT-101	Medidor de presión diferencial	Nivel de líquido en el separador
PT-501	Medidor de presión estática	Presión a la salida del sistema
CMG1 (FT-302) y CMG2 (FT-303)	Medidor de flujo tipo coriolis para la fase gaseosa a altos y bajos rangos de flujo, respectivamente	Flujo másico y temperatura
CML (FT-301)	Medidor de flujo tipo coriolis para la fase líquida	Densidad, flujo másico y temperatura (de la mezcla líquida).
PV202 y PV203	Válvulas de control de flujo para la fase gaseosa (alto y bajo rango, respectivamente)	Control del flujo volumétrico de la fase gaseosa
LV102	Válvula de control de flujo para la fase líquida	Control del flujo volumétrico de la fase líquida
WCM (WCM-401)	Medidor de corte de agua	Porcentaje de corte de agua y temperatura

Tabla 1.1 Nomenclatura de la Instrumentación, de la figura 1.16, de un lazo de medición multifásica (Godoy A. et al., 2008)

El casi nulo tiempo de residencia del líquido y las condiciones adversas de producción de los fluidos que pueden ocurrir como el flujo tipo bache, presentan condiciones que hacen muy necesario la implementación de un sistema de control (Moham R. , Wang, Shoham, & Kouba, 1998).

El funcionamiento del separador GLCC es mejorado a través de la implementación de un sistema de control adecuado, comprobado de estudios y pruebas (Wang et al., 1998), en el que los aspectos a controlar son el nivel de líquido en un rango por abajo de la entrada, la presión y la apertura de la válvula de líquido, actuando sobre las válvulas de control de flujo de gas y líquido. Las mejoras en el funcionamiento son tales que pueden mejorar seis veces las condiciones nominales de flujo si se equipa con un adecuado sistema de control (Wang et al., 2010)

Las opciones de control aplicadas en el separador GLCC han sido dos, la primera es el control pasivo con una simple configuración de salidas recombinadas, este tipo de control es la forma más fácil de control ya que no necesita energía externa (usa la energía del flujo del líquido para su funcionamiento), por lo tanto es económica, fácil de usar e ideal para aplicaciones costa afuera o campos remotos en dónde la energía sea costosa o escasa. La segunda es el control activo mediante el uso de la teórica clásica y aunque implica un costo mayor, es más precisa y confiable para su uso en campo. Otros aspectos a considerar en la instrumentación y control son los requerimientos de espacio, costos y en el caso de sistemas activos de control, energía adicional (Shoham & Kouba, 1998).

1.5.1. Estrategias de Control

Como ya se mencionó la instrumentación y control en el separador GLCC se aborda sólo en mayor detalle en las estrategias de control, debido al enfoque y alcance de esta tesis. Existe la necesidad de implementar estas estrategias de control debido a las variaciones de flujo que puede presentar la mezcla que llega al separador GLCC y con requerimientos tales como las salidas de líquido y gas separadas.

El nivel de líquido (NL) es el parámetro principal a controlar debido a la fuerte relación con el arrastre de fluidos, el cuál por ejemplo, si el NL está arriba de la entrada muy probablemente causará arrastre de líquido y si el NL está muy por abajo de la entrada producirá arrastre de gas, debido a que no se alcanza a separar las burbujas de gas, por lo tanto, el NL conveniente es un cierto rango por abajo de la entrada. La presión (P) se controla debido a su influencia con la óptima presión de operación, que debe mantenerse en cierta magnitud y que además ayuda a controlar el nivel de líquido. Finalmente, la válvula de control de líquido (LCV) es puramente controlada para ayudar a la estabilidad del sistema de control y no se presenten grandes variaciones en la apertura de las válvulas de líquido y gas (S. Wang et al., 2000). Las estrategias de control utilizan lazos de control para la adecuada operación (NL abajo de la entrada, presión óptima mínima y la menor variación del sistema) del separador GLCC, como se muestra en la tabla 1.2:

#	Parámetro a controlar	Elemento con que se controla
1	NL (Nivel de Líquido)	LCV (Válvula de Control de Líquido)
2	P (Presión)	GCV (Válvula de Control de Gas)
3	NL	GCV
4	NL	LCV y GCV
5	NL y P	LCV y GCV, respectivamente
6	NL, P y LCV	LCV y GCV

Tabla 1.2 Parámetros de los lazos de control para un adecuado funcionamiento del separador GLCC.

Para el lazo de control 1, si el NL sube demasiado la LCV se abre para bajar el NL y si el NL baja la LCV se cierra para subirlo. En el lazo de control 2, la GCV abre o cierra para mantener la presión estable en un punto. Para el lazo de control 3, si el NL sube la GCV se cierra para crear una contrapresión y baje el NL y si el NL baja la GCV se abre para liberar esta contrapresión y llevar al NL al punto establecido.

Cabe señalar que con los lazos de control descritos se pueden desarrollar otros lazos de control, como, con el 1 y 3 se forma el lazo 4, y con el 1 y 2 se forma el lazo 5 (tabla 1.2).

En el lazo de control 4, si el NL aumenta demasiado la GCV se cierra y la LCV se abre para mantener el NL. Con esta estrategia se puede lograr una respuesta más rápida y hacer que el NL no sobrepase el nivel establecido, por ejemplo, en condiciones de bacheo severo, aunque no se controla las fluctuaciones de presión.

Los lazos de control 5 y 6 son llamados integrados debido a que se busca controlar más de un parámetro. El lazo de control 5 se usa cuando se requiere mantener la presión constante, para maximizar la producción y el NL en un parámetro establecido, para evitar el arrastre de líquido. En éste el control del NL complementa el control del flujo de gas por lo que es ideal para reducir las fluctuaciones de presión en el GLCC.

El lazo de control 6 es capaz de optimizar la presión de separación y adaptarse a las condiciones de flujo de líquido y gas, por lo que para ciertas condiciones es considerada como óptima. En este lazo se controla el NL con la LCV y ésta última al mismo tiempo es controlada junto con la presión, ya sea con la apertura o cierre de la GCV (Wang et al., 2002).

Una vez descritos los lazos que buscan controlar el NL, la presión y/o la apertura de la válvula de líquido, a continuación se describen cuatro estrategias de control de acuerdo a las condiciones de operación del pozo y de los flujos de cada fase (Godoy-Alcántar et al., 2008 y Wang et al., 2010).

Estrategia 1. Líquido como fase dominante

Se considera que la LCV de ser la válvula de control principal se encontraría en apertura casi total por lo que estaría muy limitada para su manipulación. El objetivo de la estrategia es controlar el NL en un valor estable por abajo de la entrada. La estrategia de control recomendada es buscando mantener una apertura constante de la LCV y controlando con la GCV las variaciones de flujo de gas.

Estrategia 2. Gas como fase dominante

Para estas condiciones de buscar controlar el sistema con el accionamiento sólo de la GCV causaría demasiada variación en el NL, por lo que la estrategia propuesta es mantener casi constante la apertura de la GCV y el NL controlarlo con la apertura o cierre de la LCV.

Estrategia Integrada. No hay fase dominante

El flujo se comporta en forma aleatoria. El objetivo de esta estrategia es controlar el NL y la presión de separación. El control del NL se proporciona con la LCV y la presión con la GCV. Con esta estrategia se busca controlar el NL abajo de la entrada y que el separador opere a presión constante, por lo tanto, de éste último no se restringe el flujo del pozo y simultáneamente evita el arrastre de fluidos.

Estrategia Óptima. No hay fase dominante

El objetivo es el control del NL con las dos válvulas (GCV y LCV), sin embargo, se usa un lazo de control adicional para la posición de apertura de la LCV que le permita operar en valores predeterminados (óptimos), lo cual se obtiene con un sensor de apertura de la LCV que será controlada con la GCV, buscando que no existan grandes variaciones que provoquen que falle el sistema.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DEL DISEÑO

El diseño del separador gas-líquido cilíndrico ciclónico (GLCC) se basa en el entendimiento del comportamiento del flujo multifásico que ocurre en el cuerpo del separador, lo que le permite que sea confiable, predecible y viable para la industria petrolera (Movafaghian, 1997). Lo anterior se aborda estudiando la predicción de la trayectoria de burbujas y gotas, los tipos de flujos presentes en las secciones del separador, las características de los fluidos, los fenómenos de flujo multifásico dentro del cuerpo del separador y las condiciones de operación.

En este capítulo se reúne la teoría para el diseño del separador GLCC para diferentes condiciones de operación y aplicaciones, lo que es importante en la industria debido a las diversas variaciones de éstas. El diseño del separador GLCC está basado en modelos mecánicos, los cuales son verificados y detallados con datos de laboratorio y simulación CFD (por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamic).

Los modelos mecánicos se utilizan para el modelado del flujo de fluidos y son básicamente expresiones matemáticas que incluyen principios y variables físicas que buscan modelar un fenómeno presentado, que por lo general usa suposiciones simplificadas pero captan lo suficiente los fundamentos físicos del problema. Los modelos se expresan matemáticamente para proporcionar una herramienta analítica para predicción y diseño. De estos modelos se espera que sean generales y confiables para otras condiciones de flujo, debido a que incluyen los mecanismos y parámetros más importantes del flujo, como el diámetro de la tubería, ángulo de inclinación, gastos (gas y líquido) y propiedades de los fluidos (Shoham, 2006).

La diferencia de los modelos mecánicos con los métodos de diseño de los separadores convencionales es que estos últimos están basados en correlaciones empíricas, por lo tanto limitadas a las condiciones para las cuales se recabó la información experimental (Shoham, 2006).

La simulación CFD es una herramienta para representar, analizar y resolver problemas que involucran flujo de fluidos y que utilizan métodos numéricos y algoritmos para llegar a la solución (Michaelides, 2006). En ésta se simula la interacción de los fluidos con superficies definidas por condiciones de frontera.

Los modelos mecánicos proporcionan un enfoque práctico, accesible y de fácil entendimiento para los ingenieros como herramienta de diseño y predicción del funcionamiento del separador GLCC, que a diferencia de la simulación CFD, es muy elaborada y considera a detalle los fenómenos que ocurren en el separador, por lo que no es adecuada para cuestiones de dimensionamiento, pero que es necesaria para entender mejor el comportamiento del flujo dentro del separador y aspectos de investigación específicos (Shoham & Kouba, 1998).

Los modelos mecánicos en esta tesis son presentados como base y avances debido a que existen diferencias en cuanto a limitaciones y uso de los primeros en el procedimiento de diseño. En el apartado de la simulación CFD se abordan algunos resultados y observaciones de éstas que hicieron posible ir mejorando los modelos mecánicos.

La primera parte de este capítulo se presentan los denominados “Modelos Mecánicos Base” que fueron modelos presentados en las primeras publicaciones del programa TUSTP en los que se dio a conocer el comportamiento general de los fluidos dentro del separador, así como la forma de evaluación del arrastre de líquido. Estos modelos resultaron tener limitaciones, que se cubren en su gran mayoría en los nombrados “Avances de los Modelos Mecánicos”, que corresponden a una segunda parte de los modelos mecánicos.

Las mejoras de los modelos mecánicos han sido para predecir con mayor precisión el comportamiento del flujo dentro del separador y en consecuencia se han desarrollado diseños más adecuados para las aplicaciones deseadas o condiciones establecidas por la producción de los pozos.

La nomenclatura de los modelos mecánicos, tanto los considerados como base como los mejorados, se puede consultar en el Apéndice A y en las figuras proporcionadas a lo largo del texto.

2.1. Base de los Modelos Mecanísticos

La teoría base de los modelos mecánicos del separador GLCC fue desarrollada y presentada en trabajos de Arpandi (1995), Arpandi et al. (1996), Joshi (1995), Kouba et al. (1995) y Marti et al. (1996) la cual es capaz de predecir el comportamiento general del flujo dentro del separador compacto, que consiste en la distribución simple de la velocidad de los fluidos, forma de la interfase gas-líquido, el nivel de líquido, la caída de presión total y las condiciones de operación sin arrastre de líquido, que en su conjunto se describe a continuación.

Para el desarrollo de los modelos mecánicos para predecir el comportamiento del flujo en el separador compacto GLCC se hará uso de la figura 2.1 y el Apéndice A en los cuáles se muestra los parámetros geométricos y nomenclatura utilizados. En la figura 2.1 se muestra un separador GLCC en configuración de lazo de medición.

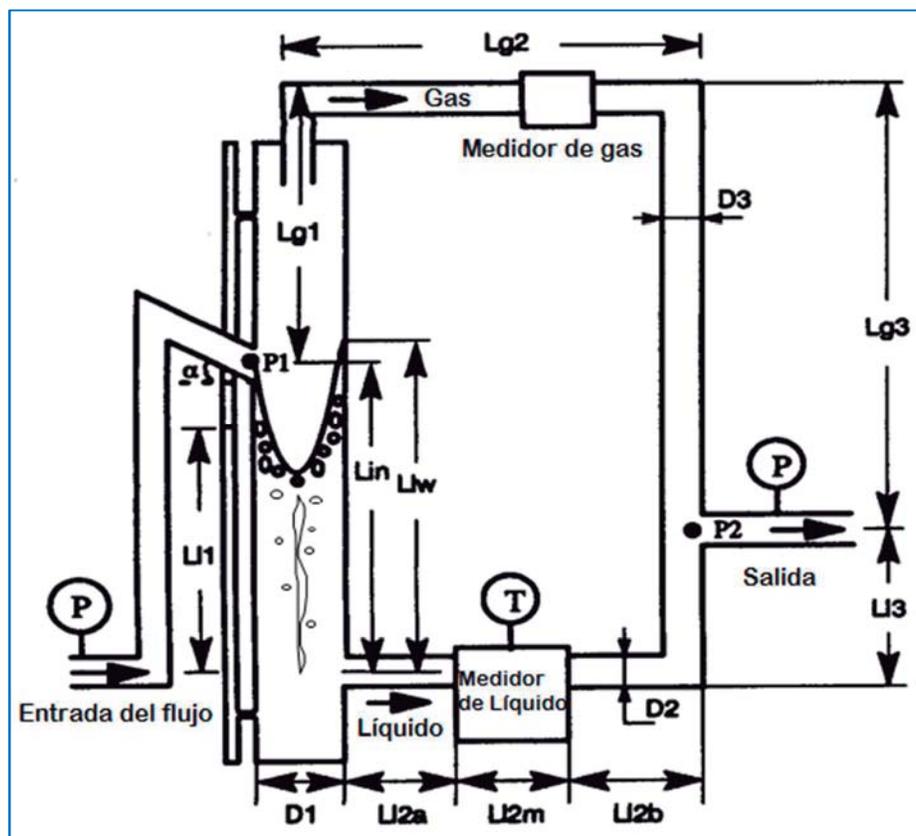


Figura 2.1 Nomenclatura y Parámetros Geométricos del Modelo Mecánico del separador GLCC (Gómez et al., 1999).

2.1.1. Nivel de Líquido (NL)

La teoría de este modelo mecánico fue presentada por Kouba et al. (1995) que para el caso de un separador GLCC en configuración de lazo, con salidas recombinadas, el nivel de líquido se determina mediante un balance de presión desde la entrada hasta el punto de recombinación de las salidas, es decir de P_1 a P_2 (figura 2.1). La caída de presión para el líquido (ΔP_L) se obtiene desde la entrada hacia abajo y continuando en su salida correspondiente y para el gas (ΔP_g) de la entrada hacia arriba y continuando hacia su salida respectiva. Las caídas de presión para el líquido y gas a través de su recorrido por el separador y sus salidas se expresan como:

$$\Delta P_L = \rho_L g(L_{l1} - L_{l3}) + \rho_g g(L_{in} - L_{l1}) - (\phi_l + \frac{f_{L1} L_{l1} \rho_L v_{L1}^2}{2D_1}) \quad (2.1)$$

$$\Delta P_g = \rho_g g(L_{g3} - L_{g1}) - \phi_g \quad (2.2)$$

De las ecuaciones anteriores “ ρ_L ” es la densidad del líquido, “ g ” es la constante de gravedad, “ L_{l1} ” es la distancia de la columna de líquido en el cuerpo del separador medida desde la salida del líquido y para fines prácticos el nivel de líquido (NL), “ f_{L1} ” es el factor de fricción en la sección de tubería 1 por donde pasa el líquido, “ v_{L1} ” es la velocidad del líquido en misma sección anterior y “ L_{l3} ” es la altura medida desde el nivel de la salida del líquido al punto de recombinación. Los términos ϕ_L y ϕ_g son las pérdidas de presión por fricción en las salidas de líquido y gas que se calculan con las ecuaciones 2.3 y 2.4 respectivamente, como se observa a continuación:

$$\phi_L = \frac{\rho_l}{2} \left(\sum_{i=2}^n \frac{f_i L_i v_i^2}{D_i} + \sum_{i=1}^n K_i v_i^2 \right)_L \quad (2.3)$$

$$\phi_g = \frac{\rho_g}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i L_i v_i^2}{D_i} + \sum_{i=1}^n K_i v_i^2 \right)_g \quad (2.4)$$

De estas ecuaciones (2.3 y 2.4) el primer término dentro del paréntesis representa las pérdidas de presión por fricción en las diferentes secciones de tuberías y el segundo término representa las pérdidas de presión entre las conexiones de tuberías.

Igualando las caídas de presión en el punto de recombinación de las salidas de líquido y gas (ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente) se obtiene la expresión para determinar el nivel de líquido:

$$NL = L_{l1} = \frac{\phi_L - \phi_g + \rho_l g L_{l3} - \rho_g g (L_{in} + L_{g1} - L_{g2})}{g(\rho_L - \rho_g) - \left(\frac{f_{l1} \rho_L v_{L1}^2}{2D_1} \right)} \quad (2.5)$$

La predicción del nivel de líquido con el modelo en comparación con datos experimentales obtuvo una buena aproximación (Wang, 1997 en Gómez, 1998).

Consideraciones en el nivel de líquido (NL):

- Debido al movimiento giratorio del líquido, el nivel de líquido calculado puede ser menor al nivel de líquido real en el cuerpo del separador.
- Este modelo no considera que exista una interacción entre las fases.
- Separación completa de las fases, es decir, no hay arrastre de fluidos.

2.1.2. Interfase Gas-Líquido

Este modelo fue desarrollado inicialmente por Arpardi I.A. (1995). La suposición principal que se hace es que los fluidos en la sección de la entrada vienen en flujo estratificado que posteriormente al pasar por la boquilla (insertada tangencialmente) son acelerados y con el movimiento circular del flujo dentro del cuerpo del separador se forma un vórtice en forma parabólica por abajo de la entrada, que en términos generales será la interfase entre el gas y el líquido, como se puede ver en la figura 2.2.

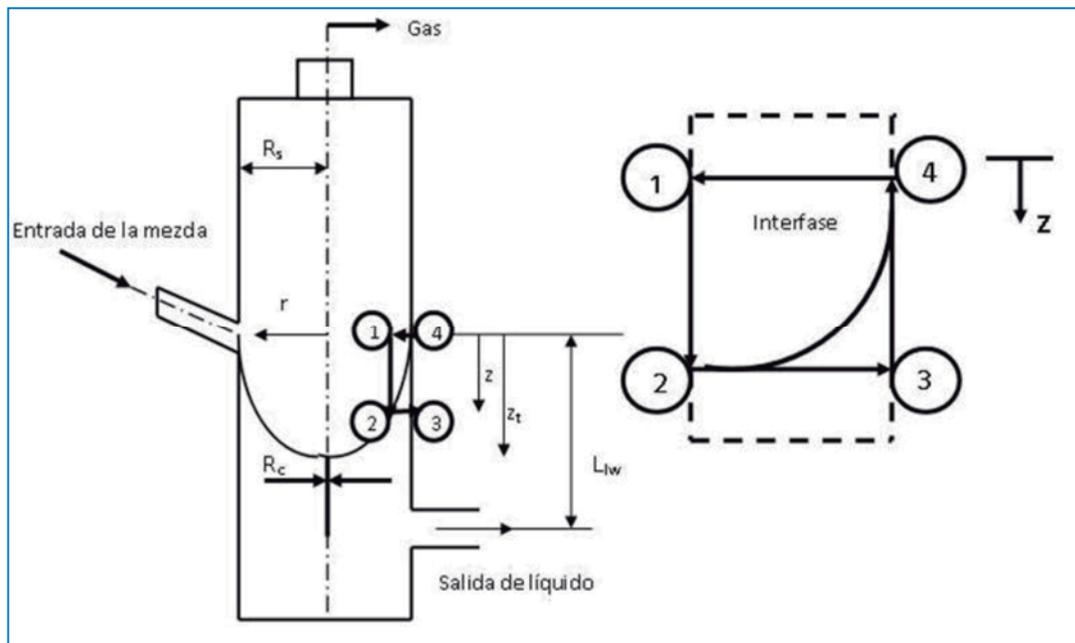


Figura 2.2 Geometría de la Interfase Gas-Líquido (Morales Cruz & Ríos Aguilar, 2010).

Para determinar la forma de la interfase gas-líquido, el vórtice, se presenta un modelo que es básicamente un balance de presiones entre los puntos del 1 al 4 (figura 2.2). Las caídas de presión entre los puntos 1 a 2 y 3 a 4 se deben a la presión hidrostática que ejerce la fase de gas y líquido, respectivamente. Se considera que no existe un cambio de presión entre los punto 4 y 1, aunque para cerrar el análisis es necesario una caída de presión entre los puntos 2 y 3, que es generada por la fuerza centrífuga aplicada a la fase líquida, requiriendo conocer la distribución de la velocidad tangencial en función del radio, expresándose de la siguiente forma:

$$v_t(r) = v_{tis} \left(\frac{r}{R_s} \right)^n \quad (2.6)$$

Donde “n” que es un exponente de la velocidad tangencial y que toma un valor de 0.9 (Arpandi, 1995) y “ v_{tis} ” es la velocidad tangencial en la boquilla, la cual se puede determinar como:

$$v_{tis} = v_{lin} \left(\frac{A_{in}}{A_{is}} \right) \cos \alpha \quad (2.7)$$

Esta velocidad tangencial en la boquilla se obtiene con la velocidad de los fluidos en la sección de entrada, en la que se usa la teoría de Taitel y Duckler (1975) para determinarla, en la que se debe considerar una corrección por la reducción de área en la boquilla (expresión entre paréntesis de la ecuación 2.7) así como por el ángulo de inclinación de la entrada.

La distribución de la densidad de la mezcla se obtiene de forma similar a la distribución de la velocidad tangencial y se obtiene como:

$$\rho_m(r) = \rho_g + (\rho_L - \rho_g) \left(\frac{r}{R_s} \right)^m \quad (2.8)$$

De donde “m” es el exponente que describe la distribución radial y para este caso se asume que sólo líquido rodea el vórtice por lo que $m=0.9$. La diferencia de presión radial entre los puntos 2 y 3 debido a la fuerza centrífuga para cualquier posición axial “z” entre los puntos 2 y 3 se determina por:

$$\Delta P(r) = \int_r^{R_s} \frac{\rho_m(r)[v_t(r)]^2}{r} dr \quad (2.9)$$

Finalmente realizando un balance de presión entre los puntos 1 y 4 nos proporciona una ecuación que representa la ubicación de la interfase para cualquier posición axial “z” en función de la coordenada “r”:

$$z(r) = \frac{\Delta P(r)}{g(\rho_L - \rho_g)} \quad (2.10)$$

Con la ubicación de la interfase para cualquier posición axial “z”, el volumen total del vórtice y el filamento de gas se obtiene con la ecuación 2.11, lo que corresponde al líquido desplazado por la formación del vórtice y que es ocupado por el gas.

$$V_g = \int_r^{R_s} 2\pi r z(r) dr + \frac{\pi}{4} D_c^2 (L_{vc} - L_v) \quad (2.11)$$

Donde $L_v = z(R_c)$ es la longitud del vórtice. El segundo término en la ecuación 2.11 es el volumen del núcleo de gas (o filamento) que va desde la base del vórtice hasta la salida de líquido, como se observa en la figura 2.2.

La altura del líquido en donde la interfase gas-líquido toca la pared del cuerpo del separador, llamada en ocasiones corona del vórtice, se calcula como si el volumen de gas total se sumergiera en el líquido, como:

$$L_{vc} = L_{l1} + \frac{V_g}{A_s} \quad (2.12)$$

2.1.3. Colgamiento sin Flujo Neto de Líquido (H_{L0})

Para el desarrollo de este modelo se hizo uso de la teoría de la burbuja de Taylor combinado con un modelo que toma en cuenta los efectos de un fluido sobre una partícula. El desarrollo de este modelo considera que se presentan baches y gotas en la parte superior del cuerpo del separador (figura 1.14). Debido a que en condiciones de colgamiento sin flujo neto de líquido, no se presenta líquido en la salida del gas, la velocidad de la mezcla en la parte superior del separador GLCC se reduce a sólo considerar la velocidad superficial del gas, o simplemente velocidad del gas, la cual se puede obtener modificando la expresión de la velocidad ascendente de la burbuja de Taylor en una tubería vertical y por otro lado obtenemos la longitud de la región de gotas (Arparadi, 1995).

La velocidad en el centro del cilindro es $C_0 v_{sg}$ y la velocidad del gas se expresa cómo se muestra en la siguiente ecuación:

$$v_{g0} = C_0 v_{sg} + 0.35 \sqrt{g D_s \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_L} \right)} \quad (2.13)$$

Para estas condiciones, se asume un valor constante del coeficiente de distribución de velocidad “ C_0 ” igual a 1.15, obtenido de pruebas de laboratorio a bajas presiones y usando como fluidos, agua y aire. Por lo tanto, el modelo del colgamiento de líquido para estas condiciones fue expresado como:

$$H_{L0} = \left[1 - \left(\frac{v_{sg}}{v_{g0}} \right) \right] \left(1 - \frac{L_d}{L_{g1}} \right) \quad (2.14)$$

De la ecuación anterior L_d , es la longitud de la región de gotas y L_{g1} es la altura total por arriba de la entrada. Sustituyendo la ecuación 2.13 en la 2.14 queda finalmente:

$$H_{L0} = \left[1 - \left(\frac{v_{sg}}{C_0 v_{sg} + 0.35 \sqrt{g D_s \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_L} \right)}} \right) \right] \left(1 - \frac{L_d}{L_{g1}} \right) \quad (2.15)$$

La longitud de la región de gotas (L_d) se obtiene de un modelo que considera a las gotas como partículas esféricas no deformables. La longitud que pueden alcanzar a recorrer las gotas está determinada por su tamaño, propiedades físicas y la velocidad inicial, esta última en función de la velocidad del gas y el colgamiento de líquido local.

$$L_d = \frac{1}{\frac{2g}{v_{sg}^2} - \frac{C_d}{2} (\rho_g v_{sg})^2 \frac{3}{32 \rho_L \sigma g}} \quad (2.16)$$

Esta ecuación puede ser reordenada para determinar la velocidad de nulo colgamiento de líquido (despejando v_{sg} en la ecuación 2.16 y en ocasiones escrita como v_{bo}), la cual es la velocidad del gas en la que no se puede mantener líquido en la parte superior sin que sea arrastrado a la salida, en la que la longitud de la región de gotas “ L_d ” es igual a la altura total por arriba de la entrada del separador GLCC “ L_{g1} ”, la fracción de gas se aproximará a uno y el colgamiento sin flujo neto de líquido tenderá a cero.

2.1.4. Trayectoria de la Burbuja

Con la predicción de la trayectoria de las burbujas se puede conocer cuándo se producirá el arrastre de gas en corriente de salida del líquido. Para calcular la trayectoria de las burbujas es necesario primero determinar la distribución de los fluidos, por lo que se inicia calculando el nivel de líquido y la forma y ubicación de la interfase gas-líquido, ambos obtenidos con modelos ya presentados.

Considerar que abajo del vórtice se forma un filamento de gas, constituido por pequeñas burbujas de gas separadas del líquido, debido a que en la región del vórtice se separan la mayor cantidad del gas, como las burbujas grandes de gas.

De este estudio se busca determinar el destino de las mismas, es decir, si serán arrastradas en la fase líquida o alcanzaran a llegar al núcleo del filamento de gas para ser llevadas a la parte superior del separador, que dependerá si las burbujas, que se mueven radialmente, alcanzan a unirse al núcleo de gas o no.

Este modelo mecánico fue presentado inicialmente por Arpari (1995) y Kouba et al. (1995), y modificado por Marti et al., (1996) para corregir algunas limitaciones y tomar en cuenta la eficiencia de separación de las burbujas y el deterioro de la velocidad tangencial. La representación usada para el modelo de la trayectoria de la burbuja se muestra en la figura 2.3 en la cual se puede observar la trayectoria que sigue la burbuja de un tiempo “ t ” a un tiempo “ $t+\Delta t$ ”:

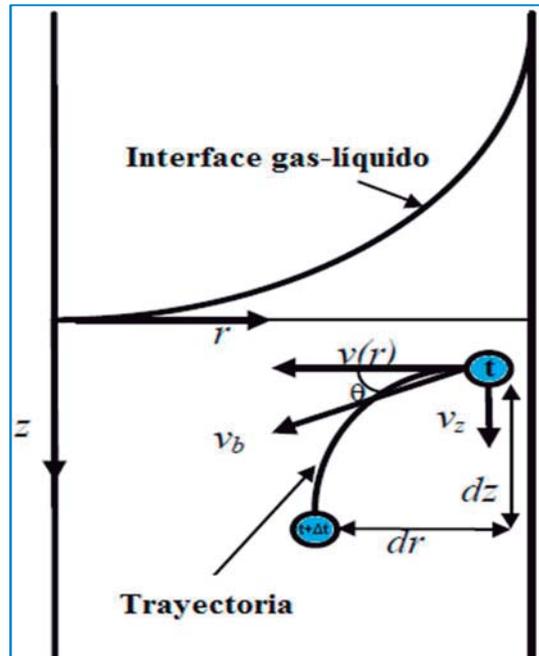


Figura 2.3 Modelo de la Trayectoria de la Burbuja (modificada de Marti, Erdal, Shoham, Shirazi, & Kouba, 1996).

En esta figura se aprecia que la burbuja se mueve en el intervalo de tiempo “ Δt ” en dos componentes, radialmente una distancia “ dr ” hacia el centro del separador debido a las fuerzas centrípetas y axialmente una distancia “ dz ” hacia abajo debido a las fuerzas de arrastre del flujo de líquido. Las respectivas velocidades son “ $v_r(r)$ ” y “ v_z ”, en las que estas variables quedan relacionadas de la siguiente forma:

$$dr = v_r(r)\Delta t \quad (2.17)$$

$$dz = v_z\Delta t \quad (2.18)$$

Igualando el “ Δt ” y despejando obtenemos que la distancia que viaja una burbuja de gas en dirección axial para ese tiempo, que se expresa como:

$$dz = \frac{dr}{v_r(r)} v_z \quad (2.19)$$

El modelo que se obtiene para determinar la trayectoria de la burbuja, se realiza en base a un balance de fuerzas sobre la burbuja (Gómez, 1998), del que surge la expresión para conocer la velocidad radial en función del radio, ecuación 2.20.

La velocidad axial se considera uniforme respecto al radio.

$$v_r(r) = \sqrt{\frac{4[\rho_m(r) - \rho_g]v_t(r)^2 D_b}{3\rho_L r C_d(r)}} \quad (2.20)$$

De donde “D_b” es un diámetro de la burbuja establecido, la distribución de la densidad de la mezcla “ρ_m(r)” se obtiene con la ecuación 2.8 y la distribución de la velocidad tangencial “v_t(r)” con la teoría de Taitel & Dukler (1975) que corresponde a una expresión como la ecuación 2.6, como ya vio anteriormente en el tema del H_{L0}:

$$v_t(r) = v_{tis} \left(\frac{r}{R_s}\right)^n \quad (2.6)$$

$$\rho_m(r) = \rho_g + (\rho_l - \rho_g) \left(\frac{r}{R_s}\right)^m \quad (2.8)$$

En las ecuaciones 2.6 y 2.8, “r/R_s” es la relación de la localización radial de la burbuja respecto al radio del separador GLCC y de las cuales tanto el exponente “m” como el “n” se debe usar el valor de 0.9.

En el trabajo de Marti et al. (1996) se establecen las condiciones de uso del coeficiente de arrastre quedando como:

$$C_d(r) = \frac{24[1+0.173 Re(r)^{0.657}]}{Re(r)} + \frac{0.413}{1+16300 Re(r)^{-1.09}} \quad \text{para } Re < 400 \quad (2.21)$$

$$C_d(r) = -10^{-7} Re(r)^2 + 10^{-3} Re(r) + 0.1222 \quad \text{para } 400 \leq Re \leq 5000 \quad (2.22)$$

$$C_d(r) = 2.4 \quad \text{para } Re > 5000 \quad (2.23)$$

Donde el número de Reynolds se determina como:

$$Re(r) = \frac{\rho_m(r)v_r(r)D_b}{\mu_L} \quad (2.24)$$

Finalmente la integración de la ecuación 2.19 y con la velocidad radial obtenida con la ecuación 2.20 es posible determinar la distancia total axial que viaja la burbuja, es decir z(r), expresandose como:

$$Z_t = \int_{R_s}^r \frac{v_z}{v_r(r)} dr \quad (2.25)$$

El uso de la ecuación 2.27, para ciertas condiciones de producción y un diámetro de burbuja dado, es mediante la asignación de radios desde $r=R_s$, radio del separador, hasta alcanzar el filamento (núcleo de gas) $r=R_c$. Los diámetros de las burbujas que generalmente se establecen para ser separadas van de 0.1-0.25 [mm] de diámetro y el diámetro del filamento de gas generalmente van de 0.01-0.5 [pg] (Gómez L. , 1998).

En la figura 2.4 se puede observar la predicción de la trayectoria de una burbuja de diámetro (D_b) de 0.5 [mm], considerando un diámetro del núcleo de gas (D_c) de 6.36 [mm], en un separador GLCC de diámetro (D) de 3 [pg] en condiciones de laboratorio con aire-agua. Para este caso, la longitud del separador GLCC abajo de la entrada debe ser por lo menos de 0.4 [m] con el fin de evitar arrastre de gas.

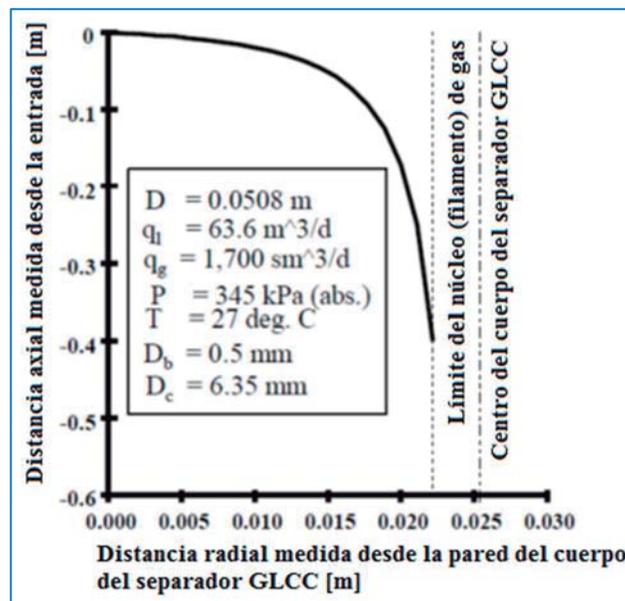


Figura 2.4 Predicción de la trayectoria de la burbuja (modificada de Kouba, Shoham, & Shirazi, 1995).

Para cuestiones de diseño y predecir el arrastre de gas, se establece un diámetro de burbuja mínimo que debe ser separado y el diámetro del filamento de gas que pudiera formarse, mencionados anteriormente, que juntos serán datos para aplicar el modelo de la trayectoria de la burbuja, en el que además se considera el deterioro de la velocidad tangencial y la eficiencia de separación, siendo estos dos últimos descritos a continuación.

Eficiencia de Separación de las Burbujas

Para definir la eficiencia de separación de burbujas de gas del líquido se hace uso de la figura 2.5 y la definición de una burbuja de diámetro d_{100} , que es el tamaño establecido más pequeño de una burbuja que viaja radialmente lo suficiente desde la pared del cilindro ($r=R_s$), por abajo del vórtice, hasta incorporarse al filamento de gas justo antes de la salida del líquido. Observar que la trayectoria de la burbuja ubicada inicialmente en la pared del cilindro. Por lo tanto, una eficiencia de separación de burbujas de 100% queda definida como la separación de todas las burbujas iguales o mayores al diámetro d_{100} mientras que un porcentaje menor de separación corresponde a la separación de burbujas de menor diámetro de d_{100} (Marti, Erdal, Shoham, Shirazi, & Kouba, 1996).

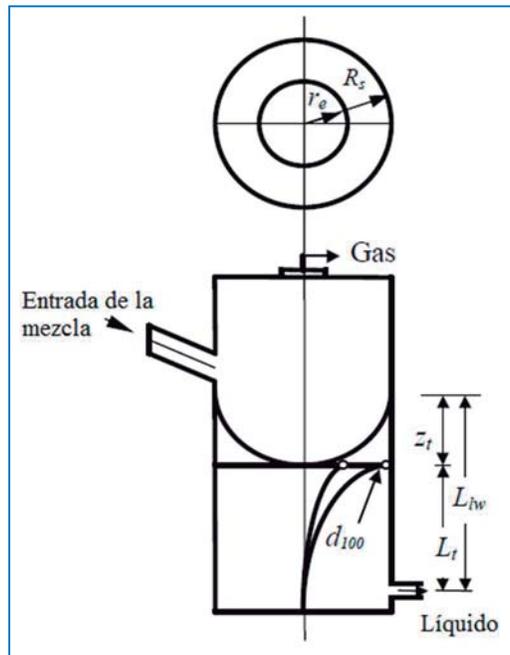


Figura 2.5 Esquema para el análisis de la eficiencia de separación (modificada de Marti et al., 1996).

Considerar que burbujas de menor diámetro pueden ser separadas si estas se encuentran en una ubicación diferente a la pared del cilindro, es decir, $R_c < r < R_s$ (ver trayectoria izquierda de la burbuja en la figura 2.5), por lo que se define otro concepto nombrado “radio efectivo de captura (r_c)” el cual corresponde al radio en el que una burbuja de cierto diámetro podrá viajar radialmente lo suficiente para incorporarse al filamento de gas.

La eficiencia de separación de esta burbuja de menor diámetro se define como la relación del área efectiva de captura y el área total de la sección, es decir, del cuerpo del separador (Marti, Erdal, Shoham, Shirazi, & Kouba, 1996).

$$E(\%) = \frac{\pi r_e^2}{\pi R_s^2} = \left(\frac{r_e}{R_s}\right)^2 \quad (2.26)$$

Deterioro de la Velocidad Tangencial

El deterioro de la velocidad tangencial es la disminución de ésta conforme el líquido gira y es llevado hacia abajo, presentándose la máxima velocidad tangencial de los fluidos en la salida de la boquilla, justo en la entrada al cuerpo del separador GLCC. Este fenómeno debe ser predicho y tomado en cuenta debido a que reduce la eficiencia de separación de las burbujas de gas del líquido (Marti et al., 1996).

Con datos de laboratorio y simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) para ciertas condiciones de operación del separador GLCC se determinó un deterioro de la velocidad tangencial en dirección axial de 5.6% a 7% por cada relación L/d (Marti et al., 1996). Estos rangos de porcentaje del deterioro de la velocidad tangencial son usados para condiciones de diseño (Gómez L. , 1998).

2.1.5. Inicio de Flujo Niebla-Anular

El inicio de flujo niebla-anular representa el comienzo del arrastre de líquido en la salida del gas, por lo tanto es el límite teórico de la capacidad de gas que el separador GLCC puede manejar para un adecuado funcionamiento del mismo. Bajo estas condiciones el inicio de flujo niebla-anular se presenta cuándo las primeras gotas finas de líquido atomizadas son arrastradas en la corriente de salida del gas. Así, para no iniciar el arrastre de líquido en la corriente de salida del gas, la v_{sg} debe ser menor a v_{n-a} , o mejor conocida como la velocidad crítica de gas ($v_{g \text{ crít}}$).

El desarrollo de este modelo utiliza el criterio de transición niebla-anular similar al sugerido por Taitel y Dukler (1980, en Kouba et al., 1995), en el que consideraron el límite de transición de flujo bache a flujo anular en tuberías verticales. En este modelo se determina la velocidad del flujo niebla-anular, que para cuestiones de diseño es un límite que no debe alcanzar y se expresa en la siguiente ecuación.

$$v_{n-a} = 0.6812 \left(\sigma We \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g^2} \right)^{0.25} \quad (2.27)$$

Para este estudio se usa un valor de $We=7$ para representar las gotas finas de líquido que se presentan en el flujo niebla anular (Kouba et al., 1995).

2.2. Avances de Modelos Mecánicos

Los modelos mecánicos presentados anteriormente fueron la base y el punto de partida para predecir el comportamiento general de los fluidos y funcionamiento del separador compacto GLCC, sin embargo, se continuó investigando, desarrollando y mejorando los modelos mecánicos para predecir con mayor confiabilidad el comportamiento del flujo que ocurre en las secciones de éste, mejorando así su funcionamiento. De los modelos mecánicos presentados anteriormente se detectaron algunas limitaciones que se describen a continuación:

Para el modelo de la interfase gas-líquido, la predicción de la velocidad tangencial de entrada no toma en cuenta el efecto de los patrones de flujo que se pueden presentar en la sección de entrada, limitado a sólo flujo estratificado. La determinación de las velocidades tangenciales del líquido y gas se aborda en el análisis de entrada y boquilla para cada patrón de flujo, con lo que se supera esta limitación y consecuentemente se presenta el modelo de la forma del vórtice (interfase gas-líquido) sin la restricción del patrón de flujo presente en la sección de entrada.

En el modelo del colgamiento sin flujo neto de líquido sólo se consideró flujo bache/transicional (gastos altos de líquido y bajos de gas) en la parte superior del separador y no incluye el flujo tipo anular (grandes gastos de gas y bajos de líquido). Además en la revisión del modelo se detectó una limitación a presiones bajas (<146.5 [lb/pg² man]) por lo que no era posible su uso en muchas situaciones. En este apartado se incluye el modelo mejorado del colgamiento sin flujo neto de líquido, con modificaciones al modelo de Arpandi et al. (1996) para poder aplicarlo a condiciones de altas presiones (>146.5 [lb/pg² man]), presentando una predicción que llega hasta 2500 [lb/pg² abs], Duncan y Scott (1998 en Chirinos et al., 2000).

La limitación del modelo de la trayectoria de la burbuja carece de un análisis para determinar la trayectoria de las gotas en la parte superior del separador GLCC. En el modelo que se presenta más adelante, además de la trayectoria de la burbuja, con un mismo modelo predice el recorrido de las gotas y burbujas, descrito en el modelo de “trayectoria unificada de la partícula”.

El deterioro de la velocidad tangencial del líquido en dirección axial expresado en los modelos base como un rango del porcentaje de deterioro, para estos modelos mejorados se presenta un modelo que considera esta reducción de la velocidad tangencial y que puede ser incluida en el modelo de la trayectoria unificada de la partícula (gota o burbuja).

Las limitaciones de los modelos mecánicos considerados base fueron superadas ampliando los patrones de flujo en los análisis, considerando otros fenómenos y presentando modelos mejorados. Lo anterior se logró con investigaciones posteriores, las cuales fueron presentadas con el tiempo y se describen a continuación:

2.2.1. Colgamiento sin Flujo Neto de Líquido (H_{L0}) Mejorado

En el modelo presentado en la base de los modelos mecánicos del colgamiento sin flujo neto de líquido se detectó que se encontraba limitado a presiones bajas, por lo que en este apartado se incluye un factor de corrección “ F_p ” para ampliar el modelo desarrollado por Arpandi et al. (1996) para condiciones de altas presiones, presentado por Chirinos et al., (2000).

La modificación se basó en datos experimentales de Duncan y Scott (1998 en Chirinos et al., 2000) en un separador GLCC de 25 [pies] de alto, 5 [pg] de diámetro, usando metano y agua a presiones de 100-500 [lb/pg² abs].

Las expresiones del factor de corrección de presión son:

$$F_p = 1 \quad \text{Para } P \leq 146.5 \text{ [lb/pg}^2 \text{ man]} \quad (2.28)$$

$$F_p = 3.7176P^{-0.2633} \quad \text{Para } P > 146.5 \text{ [lb/pg}^2 \text{ man]} \quad (2.29)$$

En este estudio además de considerar la presencia de líquido en la parte superior del separador GLCC, se realizan las modificaciones en los modelos base para determinar las condiciones de operación con cierto porcentaje de arrastre de líquido en la salida del gas.

El colgamiento sin flujo neto de líquido para altas presiones y considerando cierto porcentaje de líquido se obtiene la siguiente expresión, que es una modificación de la ecuación 2.15:

$$H'_{L0} = \left[1 - \left(\frac{v_{sg}}{1.15v_{sg} + 0.35 \sqrt{gD_s \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_L} \right)}} \right) \right] \left(1 - \frac{L_d}{L_{g1}} \right) F_p \left(1 + \frac{\%Arrastre}{100} \right) \quad (2.30)$$

De donde:

$$\%Arrastre = \left(\frac{q_{L\text{arrastrado}}}{q_{L\text{entrada}}} \right) * 100 \quad (2.31)$$

Las variables de la ecuación 2.30 se presentaron en el modelo base del colgamiento sin flujo neto de líquido. El modelo de colgamiento sin flujo neto de líquido para altas presiones es válida para $H'_{L0} > 0.2$, por lo tanto, para $0 < H'_{L0} < 0.2$ se realiza una interpolación usando las correspondientes velocidades superficiales del gas como se expresa en la siguiente ecuación:

$$H'_{L0} = \frac{0.2(v_{sg} - v_{b0})}{(v_{sg [0.2]} - v_{b0})} \quad 0 < H'_{L0} < 0.2 \quad (2.32)$$

En la figura 2.6 se presenta una predicción del colgamiento sin flujo neto de líquido para rangos de presión de 800-2500 [lb/pg² man].

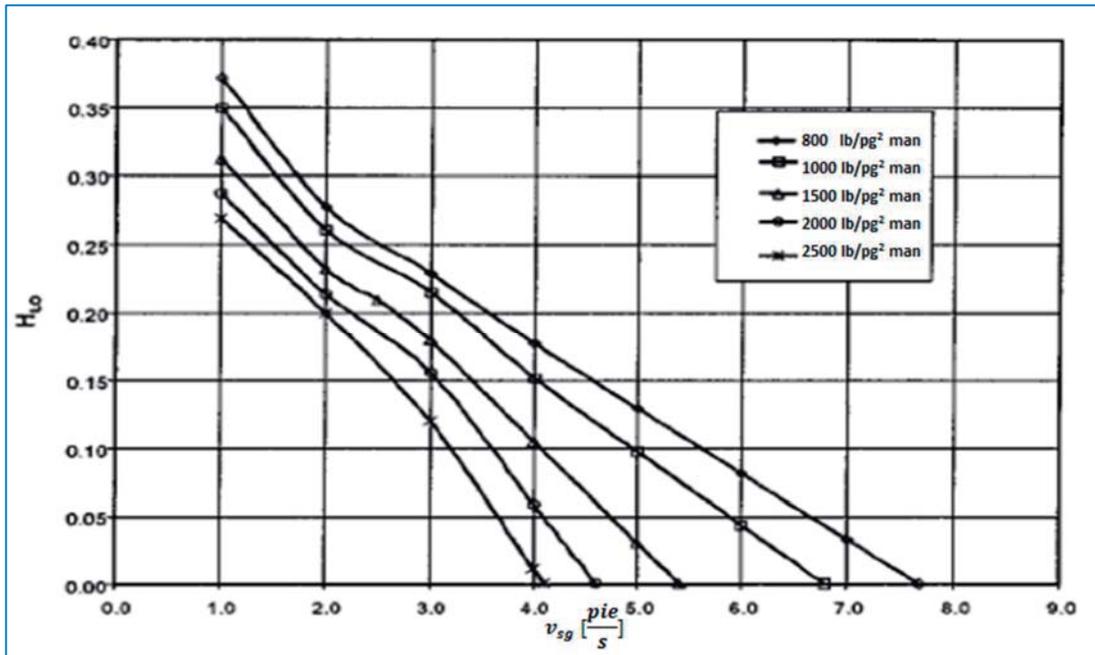


Figura 2.6 Predicción del colgamiento sin flujo neto de líquido para altas presiones (Chirinos et al., 2000).

2.2.2. Análisis en la Sección de Entrada y Boquilla

Como se mencionó en el primer capítulo se pueden presentar diferentes patrones de flujo en las secciones que conforman el separador GLCC, que para la sección de entrada principalmente puede ser estratificado, burbuja, bache o anular. La determinación del patrón de flujo no queda dentro del alcance de esta tesis, sin embargo, con la teoría de Taitel & Dukler (1975) es posible determinarlos, en el que se determinan características como distribución de los fluidos, colgamiento del líquido y velocidades de los fluidos.

El modelo de Barnea (1987) se ha usado para predecir el patrón de flujo en los estudios desarrollados por la Universidad de Tulsa con buenos resultados, el cual es un modelo general de predicción de patrones de flujo y sus características, e incluye la teoría de Taitel & Dukler (1975). El modelo anterior calcula las fronteras dónde se presentan estos patrones, determinando así para las condiciones dadas, el patrón del que se trata.

La velocidad tangencial del gas es necesaria para obtener la trayectoria de las pequeñas gotas en la parte superior del separador, lo que predice cuándo se presentará el arrastre de líquido. La velocidad tangencial del líquido se usa para determinar la forma del vórtice (interfase gas-líquido) y la trayectoria de las burbujas en la parte inferior del separador, conociendo así cuándo se presenta el arrastre de gas en la corriente de salida del líquido.

El objetivo de esta sección de la tesis, es determinar las velocidades tangenciales con las que entran los fluidos al cuerpo del separador GLCC para cada patrón de flujo. Para determinar estas velocidades tangenciales se realiza un análisis en la sección de entrada y en la boquilla, siendo esta última crítica debido a que causa la aceleración de los fluidos y dependiendo del patrón de flujo una diferencia significativa en el comportamiento del flujo. La boquilla usada para el análisis es la de placa insertada, mostrada en la figura 2.7, que demostró mejor desempeño en cuanto a condiciones normales sin arrastre de líquido (Wang S. , 1997).

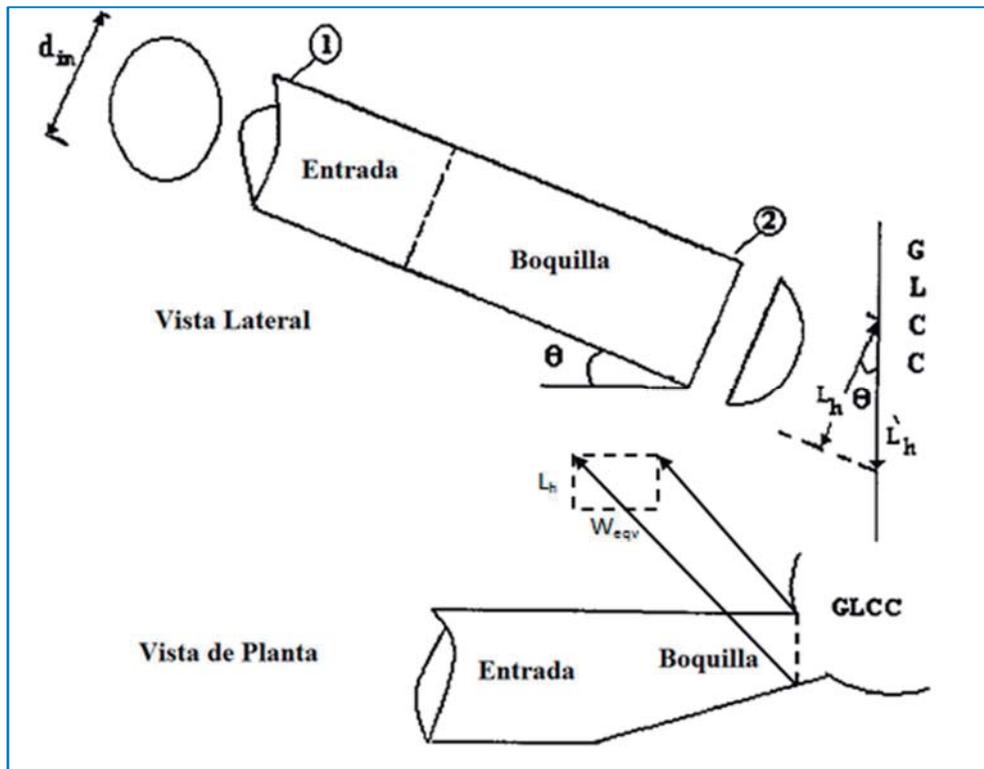


Figura 2.7 Sección de entrada del separador GLCC (modificada de L. Gómez).

Para cuestiones prácticas y de análisis, la boquilla se aproxima a un rectángulo equivalente, en la que el área se puede determinar con la siguiente ecuación 2.33:

$$A_{boquilla} = \frac{A_{in}(\%Reducción)}{100} = W_{eqv} L_h \quad \text{Para } L_h < d \quad (2.33)$$

De donde A_{in} es el área transversal de la sección de entrada en el punto 1, W_{eqv} es el ancho equivalente de la boquilla rectangular (que tiene la misma área que la boquilla de placa insertada) y L_h es la altura de la boquilla perpendicular al eje de entrada. Nótese que $L_h' = L_h / \cos\theta$.

A continuación se describen los modelos para calcular las velocidades tangenciales de entrada al cuerpo del separador del líquido y gas, dependiendo al patrón de flujo, mediante un análisis en la sección de entrada y boquilla, los cuales están desarrollados en una dimensión, en estado estacionario, isotérmicos y no considera la fricción en la boquilla. El análisis para todos los patrones de flujo se realiza sobre dos puntos, uno sobre la tubería de entrada y otro en la boquilla, puntos 1 y 2 (figura 2.7), respectivamente, en los que se determina la distribución de los fluidos y sus velocidades.

Velocidades tangenciales de entrada para flujo estratificado

En la figura 2.8 se presenta el esquema y nomenclatura para el análisis en la entrada inclinada y boquilla cuando se presenta flujo estratificado. Para estas condiciones, la altura del líquido en la entrada (punto 1) es h_{l1} y como resultado de la reducción del área transversal, debido a la boquilla (punto 2), la altura del líquido se incrementa a h_{l2} . Las velocidades correspondientes en cada punto y para cada fase se observan en la figura 2.8. Cabe señalar que las velocidades de los fluidos en el punto 2 son mayores que en el 1.

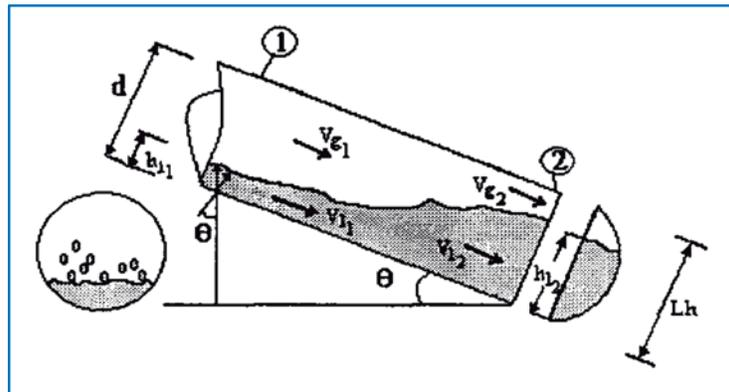


Figura 2.8 Sección de la entrada con flujo estratificado (Gómez L. , 1998).

Los parámetros que se deben determinar en el punto 1 son la velocidad del líquido, la velocidad del gas y la altura del líquido (v_{l1} , v_{g1} y h_{l1} respectivamente), siendo determinados en el modelo de Taitel & Dukler (1975). Este modelo se basa en un balance de fuerzas aplicado sobre el gas y el líquido, resultando en la ecuación 2.34, en la que implícitamente se puede obtener la altura del líquido en el punto 1 (h_{l1}), debido a que se encuentra en función de los parámetros geométricos como las áreas y perímetros que ocupa cada fase. Para resolver esta ecuación es necesario determinar los diferentes parámetros geométricos y las fuerzas de corte (τ_{wg} , τ_{wl} y τ_i).

$$\tau_{wg} \frac{S_g}{A_g} - \tau_{wl} \frac{S_l}{A_l} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_l} + \frac{1}{A_g} \right) + (\rho_L - \rho_g) g \sin \theta = 0 \quad (2.34)$$

De esta ecuación τ_{wg} , τ_{wl} y τ_i son las fuerzas de corte del gas con la pared de la tubería, del líquido con la tubería y entre las fases gas-líquido, respectivamente. A_g y A_l son las áreas que ocupa el gas y líquido, respectivamente.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Y S_l , S_g y S_i son los perímetros en que los fluidos están en contacto entre sí, el líquido con la pared de la tubería y el gas con la tubería, respectivamente.

Las fuerzas de corte se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{wl} = f_l \frac{\rho_l v_l^2}{2} \quad (2.35)$$

$$\tau_{wg} = f_g \frac{\rho_g v_g^2}{2} \quad (2.36)$$

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_g (v_g - v_{int})^2}{2} \quad (2.37)$$

Para determinar los factores de fricción correspondientes al líquido, gas e interfásial (gas-líquido) se pueden obtener con las correlaciones de Liang-Biao & Aziz (1996), la ecuación de Blasius y de Baker *et al.* (1988), respectivamente, cubriendo así todas las variables que involucra la ecuación 2.34 para obtener la altura del líquido en el punto 1 (h_{l1}).

Las otras dos variables necesarias del punto 1 son las velocidades de líquido y gas, que están definidas por la relación del gasto respecto a su correspondiente área, como:

$$v_{l1} = \frac{q_l}{A_l} \quad (2.38)$$

$$v_{g1} = \frac{q_g}{A_g} \quad (2.39)$$

Conocidas las variables de altura del líquido, velocidad del líquido y velocidad del gas en el punto 1 (v_{l1} , v_{g1} y h_{l1} , respectivamente), se procede a su uso como datos iniciales para el análisis en la boquilla (punto 2). El análisis se realiza entre los puntos del 1 a 2, y debido a que no se considera la fricción en la boquilla se usa la ecuación de Bernoulli en combinación con la de continuidad, resultando de la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\rho_l} + \frac{v_{l1}^2}{2} + g \left(\sin \theta + \frac{h_{l1}}{\cos \theta} \right) = \frac{P_2}{\rho_l} + \frac{v_{l2}^2}{2} + g \frac{h_{l2}}{\cos \theta} \quad (2.40)$$

$$v_{l2} = \frac{q_l}{W_{eqv} h_{l2}} \quad (2.41)$$

De igual forma para la fase gaseosa y despreciando los efectos gravitacionales:

$$\frac{P_1}{\rho_g} + \frac{v_{g1}^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_g} + \frac{v_{g2}^2}{2} \quad (2.42)$$

$$v_{g2} = \frac{q_g}{W_{eqv}(L_h - h_{l2})} \quad (2.43)$$

Combinando las ecuaciones (2.40 a 2.43) y considerando que el líquido y gas tienen la misma presión en un punto, se obtiene la ecuación 2.44, que determina la altura del líquido en el punto 2 (h_{l2}), como:

$$ah_{l2}^5 + bh_{l2}^4 + ch_{l2}^3 + dh_{l2}^2 - eh_{l2} + f = 0 \quad (2.44)$$

En dónde los coeficientes son:

$$a = \frac{g}{\cos \theta} \quad (2.45)$$

$$b = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) \frac{v_{g1}^2}{2} - \frac{v_{l1}^2}{2} - g \left(\sin \theta + \frac{h_{l1}}{\cos \theta}\right) - \frac{2gL_h}{\cos \theta} \quad (2.46)$$

$$c = v_{l1}^2 L_h + 2g \left(\sin \theta + \frac{h_{l1}}{\cos \theta}\right) L_h + \frac{gL_h^2}{\cos \theta} - \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) v_{g1}^2 L_h \quad (2.47)$$

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) \left[v_{g1}^2 L_h^2 - \frac{q_g^2}{W_{eqv}^2} \right] - \frac{v_{l1}^2 L_h^2}{2} - g \left(\sin \theta + \frac{h_{l1}}{\cos \theta}\right) L_h^2 + \frac{q_l^2}{2W_{eqv}^2} \quad (2.48)$$

$$e = \frac{q_l^2 L_h}{W_{eqv}^2} \quad (2.49)$$

$$f = \frac{q_l^2 L_h^2}{2W_{eqv}^2} \quad (2.50)$$

La solución numérica de la ecuación 2.44, que es una ecuación polinomial de quinto orden, se puede obtener con el método de Newton-Raphson.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Una vez determinada la altura del líquido en la boquilla (h_{l2}) es posible calcular las velocidades de gas y líquido correspondientes a este punto 2 (v_{l2} y v_{g2} , respectivamente). Sin embargo, estas velocidades tienen la dirección del eje de la entrada inclinada, por lo que debe corregirse a la componente de la dirección de la entrada tangencial (figura 2.9), responsable del movimiento giratorio de los fluidos dentro del separador GLCC.

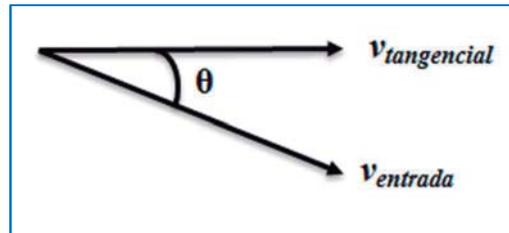


Figura 2.9 Vectores de velocidad en la entrada al cuerpo del separador GLCC.

Finalmente las velocidades tangenciales de líquido y gas en la entrada al cuerpo del separador GLCC (o si se considera la nomenclatura de la figura 2.9 v_{l2} y v_{g2}) corregidas por la dirección de la entrada tangencial quedan como:

$$v_{tl} = \frac{q_l}{h_{l2}W_{eqv}} \cos \theta \quad (2.51)$$

$$v_{tg} = \frac{q_g}{A_{boquilla} - (h_{l2}W_{eqv})} \cos \theta \quad (2.52)$$

Velocidades tangenciales de entrada para flujo burbuja

El esquema y nomenclatura de la entrada inclinada y boquilla para flujo burbuja se muestra en la figura 2.10. Este tipo de flujo se encuentra caracterizado por alto flujo de líquido y relativamente bajo de gas, en donde la fase gaseosa se encuentra dispersa en pequeñas burbujas que son arrastradas por la fase continua de líquido. En este modelo se considera homogéneas las características del flujo, es decir, que no existe resbalamiento entre fases, lo que es adecuado para este tipo de patrón de flujo. Por lo tanto, el flujo se considera como una mezcla pseudo-monofásica en las dos secciones (punto 1 y 2).

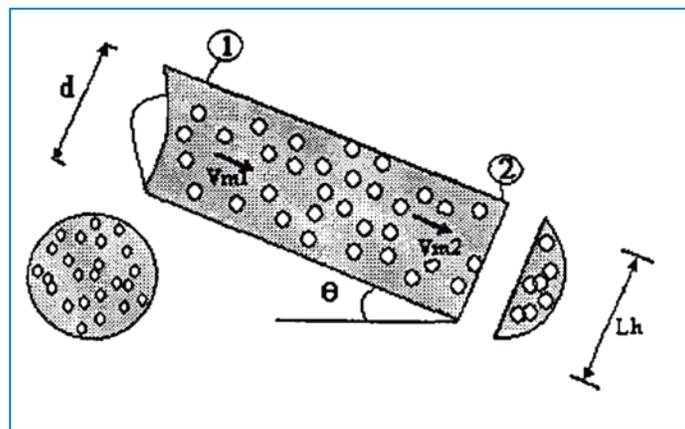


Figura 2.10 Sección de entrada con flujo burbuja (Gómez, 1998).

La velocidad de la mezcla en el punto 1 es:

$$v_{m\ in} = \frac{q_l + q_g}{A_{in}} = (v_{sl} + v_{sg})_{in} \quad (2.53)$$

Finalmente para este caso, las velocidades tangenciales de entrada al separador GLCC del gas y el líquido (o si se considera la nomenclatura de la figura 2.10 v_{m2}) son las mismas, aunque más altas respecto a las del punto 1 debido a la reducción del área por la boquilla y se determinan con la ecuación 2.54 siguiente:

$$v_{tg} = v_{tl} = v_{m2} = \frac{q_g + q_l}{A_{boquilla}} \cos \theta \quad (2.54)$$

Velocidades tangenciales de entrada para flujo bache

El esquema y nomenclatura de la sección de entrada y boquilla para condiciones de flujo bache se presenta en la figura 2.11. En ésta, se representa una llamada “unidad de bache”, cuya longitud total es L_u y consiste en dos secciones, el cuerpo del bache del líquido, con longitud L_s , y una sección formada por una bolsa de gas con una película de líquido en el fondo, con longitud $L_f=L_u-L_s$. El tiempo de residencia de la unidad de bache y el cuerpo del bache son T_u y T_s , respectivamente, por lo que el tiempo de viaje de la bolsa de líquido es T_u-T_s . En la región estratificada la velocidad de la bolsa de gas y la película de líquido son v_{gtb} y v_f respectivamente, y las velocidades del gas y el líquido en el cuerpo del bache son v_{gls} y v_{lls} , correspondientemente. Finalmente la velocidad de traslación de la interfase es v_{tb} .

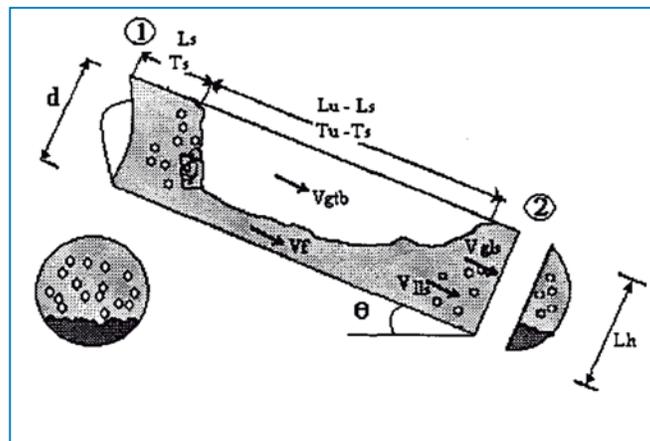


Figura 2.11 Sección de entrada con flujo bache (Gómez L. , 1998).

Debido a la naturaleza transitoria cíclica del flujo bache, caracterizado por la variación de las condiciones de flujo con el tiempo, se consideran las velocidades promedio del gas y líquido en la sección de entrada (corriente arriba de la boquilla) para facilidad del análisis. Estas expresiones que corresponde al punto 1 de la figura 2.11, como función del tiempo del viaje y longitud, están dadas como:

$$\bar{v}_{l \text{ corriente arriba}} = v_{l \text{ ls}} \frac{T_s}{T_u} + v_f \frac{T_u - T_s}{T_u} = v_{l \text{ ls}} \frac{L_s}{L_u} + v_f \left(1 - \frac{L_s}{L_u}\right) \quad (2.55)$$

$$\bar{v}_{g \text{ corriente arriba}} = v_{g \text{ ls}} \frac{T_s}{T_u} + v_{g \text{ tb}} \frac{T_u - T_s}{T_u} = v_{g \text{ ls}} \frac{L_s}{L_u} + v_{g \text{ tb}} \left(1 - \frac{L_s}{L_u}\right) \quad (2.56)$$

Estas ecuaciones representan las velocidades promedio a las condiciones en el punto 1 por lo que para realizar un análisis de las condiciones transitorias propias de este patrón y obtener las velocidades tangenciales a la entrada del cuerpo del separador GLCC (punto 2), se debe proceder a calcularlas considerando flujo tipo burbuja, cuándo pasa el cuerpo del bache en la boquilla y como flujo estratificado cuándo fluya la bolsa de gas. Los análisis de estos dos flujos ya se presentaron anteriormente.

Las variables de las ecuaciones 2.55 y 2.56 como son la distribución del colgamiento del líquido, velocidades y longitudes para cada zona de la unidad del bache se obtienen de la ecuación de continuidad y la teoría de Taitel & Barnea (1990 en Gómez, 1998) en la que esta última tiene la premisa que el filamento de líquido es uniforme a lo largo de la zona de la bolsa de gas y se expresan de la siguiente manera:

$$v_m = v_{sl} + v_{sg} = v_{l\ ls} H_{L\ ls} + v_{g\ ls} (1 - H_{L\ ls}) \quad (2.57)$$

De dónde el colgamiento en el cuerpo del bache:

$$H_{L\ ls} = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_m}{28.41}\right)^{1.39}} \quad (2.58)$$

La expresión para la velocidad del gas en el cuerpo del bache v_{gls} y su longitud l_s se obtienen como:

$$v_{g\ ls} = v_m + 1.54 \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_g)}{\rho_L^2} \right]^{0.25} H_{L\ ls}^{0.5} \quad (2.59)$$

$$L_s = 15L_{in} \quad (2.60)$$

La velocidad del bache, que es la velocidad de la interfase entre las fases de líquido y gas en la bolsa de gas se obtiene como:

$$v_{gtb} = 1.25v_m + \sqrt{gd_{in}} (0.54 \cos \theta + 0.35 \sin \theta) \quad (2.61)$$

La longitud de la película de líquido:

$$L_f = L_s \left[\frac{v_{l\ ls} H_{L\ ls} - v_{sl}}{(v_{sl} - v_{l\ ls} H_{L\ ls} - v_{tb})(1 - H_{L\ ls})(v_{tb}(1 - H_{L\ ls}))} \right] \quad (2.62)$$

Así la longitud total del bache se calcula simplemente como:

$$L_u = L_f + L_s \quad (2.63)$$

Velocidades tangenciales de entrada para flujo anular

El flujo anular está caracterizado por una película de líquido alrededor de la tubería que viaja a bajas velocidades en comparación con el núcleo de gas que se desplaza en el centro a relativamente altas velocidades. Éste núcleo de gas lleva dispersas pequeñas gotas de líquido. El espesor del filamento de líquido es más grande en el fondo que en la parte superior de la tubería debido a los efectos gravitacionales. El flujo en el núcleo es considerado homogéneo, es decir, no se presenta resbalamiento entre la fase gaseosa y las gotas de líquido que lleva suspendidas. El núcleo de gas es acelerado conforme éste pasa por la boquilla.

Por parte de la película de líquido, se considera que se presenta en flujo laminar, que es consistente con la física de flujo anular en la que la velocidad de la película de líquido es más baja que la del núcleo de gas. Cabe destacar que la película de líquido no sufre variación significativa en la velocidad conforme fluye a través de la boquilla, lo cual fue observado durante los experimentos de Movafaghian (1997), por lo que la velocidad del líquido en el punto 1 y en la boquilla (punto 2) se consideran iguales. El esquema y nomenclatura del flujo anular en la boquilla se puede observar en la figura 2.12.

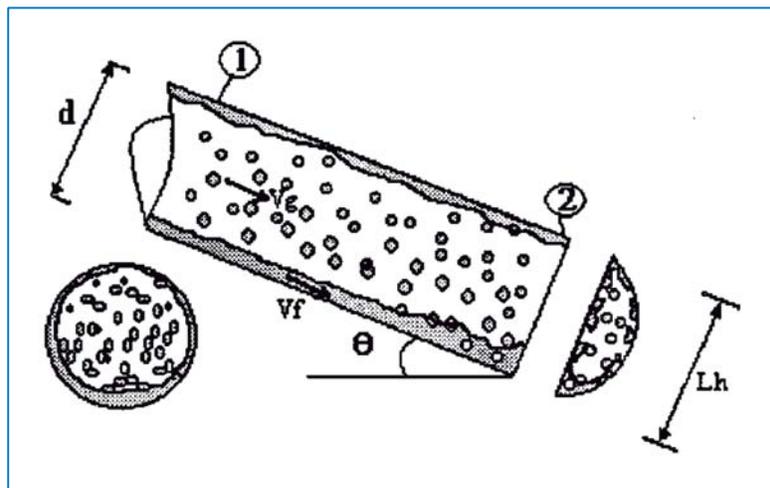


Figura 2.12 Sección de entrada con flujo anular (Gómez, 1998).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Para este trabajo, la velocidad del núcleo se aproxima a la velocidad superficial del gas debido a la pequeña película de líquido, $\delta \ll d$, de donde “ δ ” es el espesor de la película de líquido y “ d ” el diámetro de la tubería de entrada.

La velocidad del gas en la entrada (punto 1) se obtiene de la suma de la velocidad superficial de gas y de las gotas de líquido (ecuación 2.64).

$$v_{g1} = v_{sg} + v_{sl} F_E \quad (2.64)$$

De donde “ F_E ” es la fracción de entrada que se calcula como:

$$F_E = 1 - e^{-0.125(\varphi - 1.5)} \quad (2.65)$$

De donde:

$$\varphi = 10^4 \frac{v_{sg} \mu_g}{\sigma} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5} \quad (2.66)$$

La velocidad tangencial del gas (v_{tg}) en la entrada al cuerpo del separador GLCC (punto 2) se obtiene de la velocidad del núcleo de gas, acelerada por la boquilla y corregida por la dirección de la componente tangencial, resultando en la siguiente ecuación:

$$v_{tg} = v_{g1} \frac{A_{in}}{A_{boquilla}} \cos \theta \quad (2.67)$$

Para el caso de la velocidad tangencial del líquido (v_{tl}) a la entrada del separador GLCC (punto 2) es determinado mediante un balance de fuerzas sobre la película del líquido, resultando en la siguiente ecuación:

$$v_{tl} = \left[\frac{(\rho_L - \rho_C) g \sin \theta \delta^2}{3\mu_L} + \left(f_i \frac{\rho_C \bar{v}_{CN}^2}{4\mu_L} \right) \delta \right] \cos \theta \quad (2.68)$$

De la ecuación anterior \bar{v}_{CN} es la velocidad promedio del núcleo de gas entre los puntos 1 y 2 y se calcula con la ecuación 2.69 y δ es el espesor que se obtiene con la ecuación 2.70.

$$\bar{v}_{CN} = \frac{v_C}{2} \left(1 + \frac{A_{in}}{A_{boquilla}} \right) \quad (2.69)$$

$$\frac{\pi d(\rho_L - \rho_c)g \sin \theta}{3\mu_L} \delta^3 + \pi d \left(f_i \frac{\rho_c \bar{v}_{cN}^2}{4\mu_L} \right) \delta^2 - (1 - F_E)q_l = 0 \quad (2.70)$$

De la ecuación 2.70 se puede calcular el espesor de la película de líquido y una vez obtenido se puede determinar la velocidad de la película de líquido sustituyendo el valor del espesor en la ecuación 2.68.

Se debe destacar que para valores extremadamente pequeños del espesor de la película de líquido “ δ ” ($F_E \approx 1$) no se identifica la película de líquido separada y por lo tanto, todo el líquido presente se encuentra disperso en el núcleo de gas. Para este caso de flujo con pequeñas gotas de líquido, no se calculan las velocidades tangenciales de líquido o gas y la velocidad tangencial del líquido se calcula con la ecuación 2.64 con $F_E=1$.

De las ecuaciones 2.68 y 2.70 “ f_i ” es el factor de fricción interfásial obtenido por la correlación de Henstock y Hanratty (1976 en Gómez, 1998) que no se escribe aquí, pero que es independiente del espesor de la película de líquido.

Las velocidades tangenciales con las que se entra al cuerpo del separador GLCC determinan el comportamiento de las gotas en la parte superior, la forma del vórtice y la trayectoria de la burbuja en la parte inferior. Las ecuaciones que gobiernan el análisis de la forma del vórtice se presentan en la sección siguiente seguido del modelo unificado de la trayectoria de la partícula que determina la trayectoria de las burbujas y las gotas en un medio de flujo girando.

2.2.3. Forma del Vórtice

La principal suposición para este modelo es que el flujo tangencial que entra en el cuerpo del separador GLCC forma un vórtice, el cual gira a una velocidad angular constante “ ω ”, ver figura 2.13. Debido a las altas velocidades tangenciales de entrada, algunas burbujas de gas entran en la fase de líquido rotando debajo de la interfase gas-líquido, que de no alcanzar el filamento de gas provocará arrastre de gas, por lo que predecir la forma vórtice ayuda a determinar si las burbujas son separadas o arrastradas en la corriente de salida del líquido.

En este modelo es necesario conocer la velocidad angular del vórtice, que se obtiene con la velocidad tangencial del líquido a la entrada del cuerpo del separador GLCC, obtenida en el análisis de la entrada y boquilla. Este análisis sólo es válido cuando el nivel de líquido se encuentra abajo de la entrada del separador GLCC, debido a que en el caso contrario no se tiene un vórtice bien definido, además de que estas condiciones no favorecen a una separación adecuada.

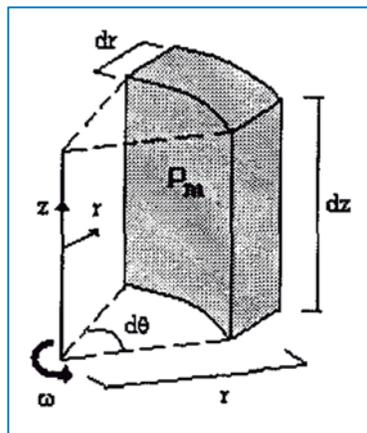


Figura 2.13 Esquema y nomenclatura del volumen de control rotando (Gómez, 1998).

La velocidad angular del vórtice está dada por:

$$\omega = \frac{v_{tl}}{R_s} \quad (2.71)$$

El desarrollo del modelo se realiza en base a un balance de fuerzas, sobre un volumen de control en un sistema coordinado cilíndrico, que como resultado se obtiene una expresión que determina la forma del vórtice, que se presenta en la ecuación siguiente:

$$z = L_{l1} - \frac{\rho_v \omega^2 d_s^2}{4g} \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{2r}{d_s} \right)^2 \right] \quad (2.72)$$

Las variables involucradas de la ecuación 2.72 son el nivel de líquido “ L_{l1} ” (figura 2.1), “ ω ” la velocidad angular del líquido y “ ρ_v ” que es la densidad equivalente del vórtice y se determina con la ecuación 2.73, considerando $n=2$, donde n es el exponente de distribución de la densidad, igual que en el modelo de Arpandi I. A., (1995).

$$\rho_v = \left[\frac{\rho_g}{2(\rho_L - \rho_g)} + \frac{1}{n+2} \left(\frac{2r}{d_s} \right)^n \right] \quad (2.73)$$

El uso de la ecuación 2.72 es mediante la asignación de valores al radio desde $r=0$ a $r=R_{sep}$, por lo tanto, se obtiene pares de puntos que graficados representan, la forma del vórtice o llamado interfase gas-líquido en los modelos base. Considerar que para $r=0$ obtendremos el punto más bajo, debido a que la forma del vórtice es parabólica y el punto más alto se encuentra en $r=R_s$.

La longitud del vórtice se puede determinar con la ecuación 2.72, realizando la diferencia de $z(r=R_{sep})-z(r=0)$ quedando como:

$$L_v = \left[\frac{(n+2)\rho_g + (\rho_L - \rho_g)}{(n+2)(\rho_L - \rho_g)} \right] \left(\frac{v_{tl}^2}{2g} \right) \quad (2.74)$$

De una comparación entre este modelo de forma del vórtice respecto al modelo de la interfase gas-líquido, de los modelos mecánicos base, se obtuvo predicciones muy similares. Cabe señalar que este modelo tiene una solución analítica y el modelo de Arpandi et al. (1996) una solución numérica.

2.2.4. Trayectoria Unificada de una Partícula (Burbuja o Gota)

En modelos anteriores se ha intentado predecir la trayectoria de las burbujas en la parte inferior del cuerpo del separador GLCC (Kouba et al., 1995 y Marti, et al., 1996), sin embargo, ahora se describe un modelo unificado que predice tanto la trayectoria de las burbujas en un medio líquido, como la trayectoria de gotas en un medio gaseoso, que sucede en la parte superior del cuerpo del separador GLCC.

Como ya se describió anteriormente, la velocidad tangencial del líquido con que entra al cuerpo del separador, es la causa que forma el movimiento circular abajo de la entrada y determina la forma del vórtice. La parte superior del separador GLCC es caracterizada por el movimiento de gotas de líquido en un medio de gas en movimiento, resultado de la velocidad tangencial de gas de entrada. El movimiento de la fase dispersa en la parte superior e inferior del separador GLCC puede ser caracterizada por el modelo de trayectoria de la partícula unificada. Este modelo describe la trayectoria de una burbuja en un medio líquido girando y una gota en un medio de gas girando.

El campo de flujo de una fase continua girando está definido por tres componentes de velocidad: tangencial v_{ct} , axial v_{cz} y radial v_{cr} , siendo esta última de una magnitud que en comparación con la tangencial y axial resulta despreciable, considerada así por varios investigadores, por lo que fue ignorada en el análisis. Los perfiles de velocidad tangencial y axial se muestran en la figura 2.14. Las investigaciones también demuestran que existe un contraflujo en el perfil de velocidad axial alrededor del centro de la tubería (figura 2.14).

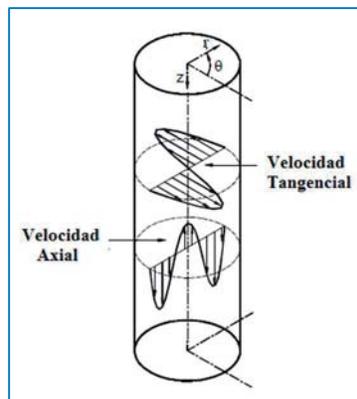


Figura 2.14 Sistema coordenado en el GLCC y los perfiles de velocidades típicos: axial y tangencial (Mantilla, Shirazi, & Shoham, 1999).

Como ya se mencionó, la velocidad tangencial se deteriora en dirección axial, hacia abajo, lo que ocasiona un decaimiento en el flujo rotacional, sin embargo, para este análisis se considera un perfil de velocidad tangencial lineal y una velocidad axial constante e igual a la velocidad promedio, como se muestra en la figura 2.15.

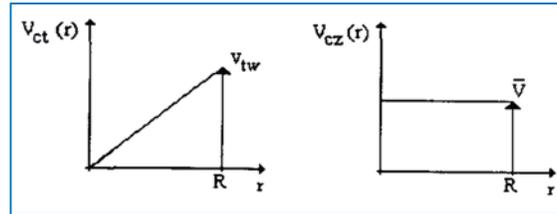


Figura 2.15 Distribución de las velocidades tangencial y axial (Gómez, 1998).

El objetivo de este modelo es que busca ser un modelo válido, simple y unificado para la trayectoria de burbujas y gotas, con base en principios similares. El modelo se basa en un medio continuo girando, que corresponderá a la fase de mayor proporción, el cual contiene una fase dispersa. Para el desarrollo del modelo de la fase dispersa considera una partícula simple y no deformable que se mueve independientemente (sin interacción) en un medio infinito, bajo circunstancias isotérmicas y sin transferencia de calor. Este modelo permite determinar la distribución del tamaño y forma de la partícula (gota o burbuja). Para este modelo, la forma de la partícula se supone esférica y no deformable.

Para el modelo, la fase continua girando es representada con el subíndice “c” y la partícula dispersa (burbuja o gota) con el subíndice “p”. La fase dispersa presenta un único patrón de movimiento, para gotas y burbujas, según sea el caso. La gota como la fase dispersa en la fase continua de gas, se mueve del centro del cuerpo del separador hacia la pared, lo que ocurre en la parte superior del separador GLCC. Por otro lado, las burbujas se mueven de la pared del cuerpo del separador hacia el centro en la parte baja del separador. La diferencia en el comportamiento de flujo se debe a los efectos de las fuerzas que actúan en los fluidos girando, como las fuerzas centrífugas y de flotación.

Modelo de la fase dispersa

El modelo fue desarrollado a través de un balance de fuerzas, con la ecuación de continuidad y con propiedades promedio de la partícula (gota o burbuja). Se considera que las magnitudes como la masa de la partícula “ m_p ” y su velocidad “ v_p ” son más pequeñas respecto a las de la fase continua.

Para calcular la posición principal de las partículas se debe conocer la distribución de la velocidad radial de la partícula que se obtiene de la siguiente forma:

$$v_{pr}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p - \rho_c}{\rho_c} \right) \left(\frac{v_{ct}(r)^2}{r} \right) \left(\frac{d_p}{Cd} \right) \left(\frac{1}{v_{pd}(r)} \right) \quad (2.75)$$

De la ecuación anterior ρ_p es la densidad de la fase dispersa (partícula), ρ_c es la densidad de la fase continua, $v_{ct}(r)$ es la velocidad tangencial de la fase continua (para diferentes radios), r es el radio considerado, d_p es el diámetro de la partícula (gota o burbuja), C_d es el coeficiente de arrastre y $v_{pd}(r)$ es la velocidad de la fase continua relacionada a la fuerza de arrastre sobre la partícula (basada en la velocidad relativa de la partícula), que se determina con la ecuación 2.76.

De la ecuación 2.75 la velocidad tangencial de la fase continua $v_{ct}(r)$, sí se toma en cuenta el deterioro de la velocidad tangencial, que se aborda en el siguiente tema, se debe sustituir por la ecuación 2.84. Las demás variables de la ecuación 2.75 se describen y se obtienen de la siguiente forma.

$$v_{pd}(r) = \sqrt{v_{pr}^2(r) + v_{pz}^2(r)} \quad (2.76)$$

De igual forma con un balance de fuerzas la velocidad de la partícula dada por la Ley de Stokes es:

$$v_{pz}(r) = \frac{(\rho_p - \rho_c)d_p^2}{18\mu_c} \quad (2.77)$$

Note que v_{pd} y v_{pz} son las velocidades relativas a la fase dispersa.

Para el cálculo del coeficiente de arrastre se hace uso de expresiones específicas, dependiendo de la partícula, de gotas o burbujas, como:

El coeficiente de arrastre para gotas es:

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) \quad (2.78)$$

El coeficiente de arrastre para burbuja es:

$$C_d = \frac{16}{Re} \left\{ 1 + \left[\frac{8}{Re} + \frac{1}{2} (1 + 3.315Re^{-0.5}) \right]^{-1} \right\} \quad (2.79)$$

En ambos casos (burbuja y gota) en el cálculo del coeficiente de arrastre, el número de Reynolds se determina con el diámetro de la partícula y con las características promedio del flujo.

Trayectoria de la Partícula

La ubicación de la partícula al tiempo “t” y al tiempo “t+Δt” se muestra en la figura 2.16. La partícula se mueve radialmente a la velocidad $v_{pr}(r)$ (cuando la velocidad radial de la fase continua $v_{cr}(r)$ es despreciada) y axialmente a una velocidad equivalente a la resultante de la velocidad del fluido que lo rodea $v_{cz}(r)$, por lo que la velocidad de la partícula (cayendo o subiendo) es $v_{pz}(r)$.

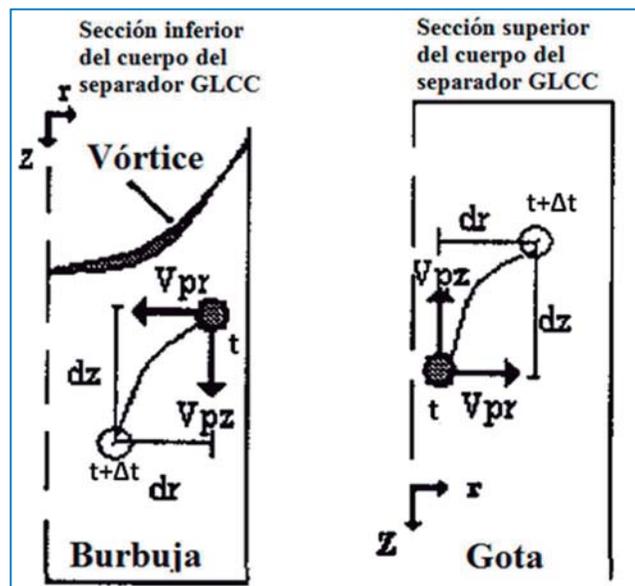


Figura 2.16 Trayectoria de la burbuja y gas (modificada de Gómez, 1998).

Durante un intervalo de tiempo Δt , la partícula se mueve $dr = v_{pr}(r)\Delta t$ y $dz = [v_{cz}(r) + v_{pz}(r)]\Delta t$ en dirección radial y axial, respectivamente. Igualando el período de tiempo para el movimiento radial y axial de la partícula y resolviendo para una distancia axial, lleva a la ecuación que gobierna la trayectoria de la partícula en un flujo rotatorio, que resulta como:

$$\Delta z_p = \int \frac{v_{cz}(r) + v_{pz}(r)}{v_{pr}(r)} dr \quad (2.80)$$

El modelo de la trayectoria de la partícula unificada presentado en la ecuación anterior puede ser usado para definir la trayectoria de la burbuja considerando al líquido como la fase continua y el gas como la fase dispersa.

La ubicación axial inicial para la trayectoria de la burbuja es la base del vórtice. En la región del vórtice las burbujas grandes son separadas fácilmente. En la base del vórtice las pequeñas burbujas remanentes se asume que están homogéneamente distribuidas. Abajo del vórtice, las burbujas se mueven radialmente hacia el centro del separador GLCC con una velocidad v_{pr} y axialmente hacia abajo con una velocidad resultante de $v_{pz}(r) = [v_{cz}(r) + v_{pz}(r)]$.

La estrategia numérica para la solución de la trayectoria de la burbuja es iniciando con ubicación de la burbuja en la pared del separador GLCC ($r=R_s$) avanzando en dirección radial hacia el centro del separador ($r=0$) usando incremento de Δr y resolviendo para la posición axial. La figura 2.17 muestra ejemplos de dos burbujas de diferente tamaño.

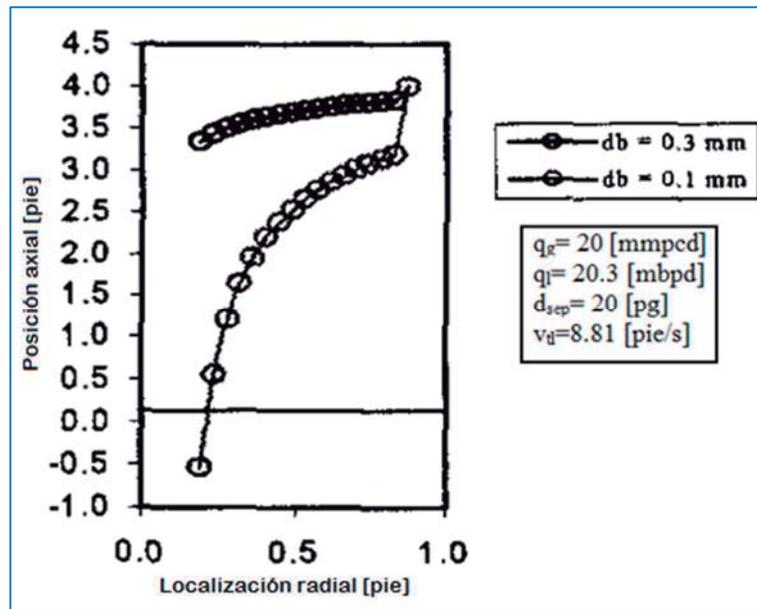


Figura 2.17 Ejemplos de trayectoria de dos burbujas para diferente posición inicial (Gómez, 1998).

De forma similar el modelo se puede usar para la trayectoria de gotas considerando el gas como la fase continua y el líquido como la dispersa. En la parte superior del cuerpo del separador las gotas son formadas por la intensidad del flujo de gas girando, llevando a las gotas hacia la pared radialmente a una velocidad “ v_{pr} ” y hacia arriba axialmente con una velocidad resultante “ $v_{cz}(r)+ v_{pz}(r)$ ”.

El método para la obtener la trayectoria de la gota se debe de desarrollar con una simulación numérica para sucesivos instantes de tiempo, iniciando en el instante en que la gota es liberada en el centro por arriba de la entrada al cuerpo del separador y considerando positivas las direcciones hacia abajo y hacia afuera, en dirección de la pared del separador GLCC. Si la gota viaja radialmente lo suficiente hacia afuera chocando con la pared del separador formará un espiral de líquido hacia arriba forzado por el flujo de gas.

La trayectoria de la partícula determina la longitud mínima de la sección superior del separador GLCC, para un diámetro dado, necesario para evitar que las gotas sean arrastradas en la corriente de salida del gas. El modelo también determina la longitud mínima en la sección inferior del separador, para un cierto diámetro, necesario para evitar que una burbuja de cierto tamaño sea arrastrada por la corriente de salida de líquido. Así este modelo puede ser usado como una herramienta de diseño del separador GLCC para una optima relación L/d y evitar el arrastre de fluidos.

Deterioro de la velocidad tangencial

En los modelos mecanísticos base ya se hablo del deterioro de la velocidad tangencial de los fluidos en dirección axial, sin embargo, sólo se presento un rango del porcentaje del deterioro por cada relación L/d, que es válido para un rango de condiciones dadas, por lo que el objetivo de este modelo es eliminar esta limitación y ser válido para implementarse en el modelo de trayectoria unificado de la partícula (burbuja y gota).

Este modelo define el deterioro de la velocidad tangencial en dirección axial con un llamado “factor de intensidad de giro, Ω ”, que surge de una relación de fuerzas tangencial y axial a través de una sección de la tubería (Gómez, et al., 1999) y que matemáticamente se expresa en la ecuación 2.81:

$$\Omega = 1.48 \left(\frac{\dot{m}_t^2 A_s}{\dot{m}_s^2 A_{fase}} \right)^{0.93} \exp \left[-0.113 \left(\frac{\dot{m}_t^2 A_s}{\dot{m}_s^2 A_{fase}} \right)^{0.35} \left(\frac{z}{d_s} \right)^{0.7} \right] \quad (2.81)$$

De donde \dot{m}_t es el correspondiente gasto total másico de líquido o gas a través de la boquilla, \dot{m}_s es el gasto másico total de líquido o gas en el cuerpo del separador GLCC y A_{sep} y A_{fase} son las áreas de la sección transversal del separador GLCC y el área que ocupa el líquido o el gas en la boquilla, respectivamente.

Note que Ω es función de la ubicación axial “z”. Una vez determinado Ω en todas las secciones transversales del separador GLCC se puede obtener la velocidad tangencial que se presenta en la pared de la tubería para cualquier ubicación axial dada como:

$$v_{tw}(r) = \frac{3}{2} \bar{v} \Omega \quad (2.82)$$

De donde:

$$\bar{v} = \frac{4q}{\pi d_s^2} \quad (2.83)$$

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Debido a que se asume que el perfil de velocidad tangencial es lineal y el de la velocidad axial constante e igual al promedio \bar{v} (figura 2.15), la distribución de la velocidad tangencial resulta en la siguiente expresión:

$$v_{ct}(r) = v_{tw}(z) \frac{r}{R_s} \quad (2.84)$$

El límite de la velocidad tangencial es la que se presenta en la entrada al cuerpo del separador. La ecuación 2.84 permite determinar $v_{tw}(z)$ para considerar el deterioro de la velocidad tangencial a lo largo del cuerpo del separador. Este perfil de velocidad tangencial se debe usar en el análisis de trayectoria de la partícula (burbuja o gas).

Tomar en cuenta que la velocidad máxima tangencial, presente en la entrada al cuerpo del separador, puede producir daño por erosión en el interior del separador en la región de la entrada, por lo que la velocidad de erosión es usada como límite de diseño del separador GLCC pudiéndose basar en la norma API RP 14E para ser determinada o la apropiada de acuerdo a la normatividad de construcción de cada país.

2.3. Simulación CFD

El enfoque de la simulación CFD, siglas de Computational Fluid Dynamics, en el estudio del separador GLCC es para verificar y detallar los modelos mecánicos, debido a que aborda a detalle el complejo flujo en el cuerpo del separador GLCC (Chirinos et al., 2000 y Erdal F. et al., 1997), por lo que no es usada para propósitos de diseño, si no más enfocada a estudiar características del flujo específicas (Marti et al. 1996).

Los primeros resultados de simulaciones CFD en el separador compacto GLCC se presentaron en el artículo de Erdal et al., (1997), en el que buscaban conocer a mayor detalle los mecanismos de separación de las burbujas de gas de una fase continua de líquido, obteniendo modelos para determinar la eficiencia de separación de burbujas, el deterioro de la velocidad tangencial y distribución de la velocidad radial de los fluidos en el cuerpo del separador GLCC considerando turbulencia abajo del vórtice (Marti et al. 1996).

Para la simulación se tiene que crear la configuración geométrica del separador GLCC mediante un mallado, que para el caso del estudio de Erdal et al. (1997) consistía en más de 90000 puntos, que esquemáticamente se puede observar en la figura 2.18.

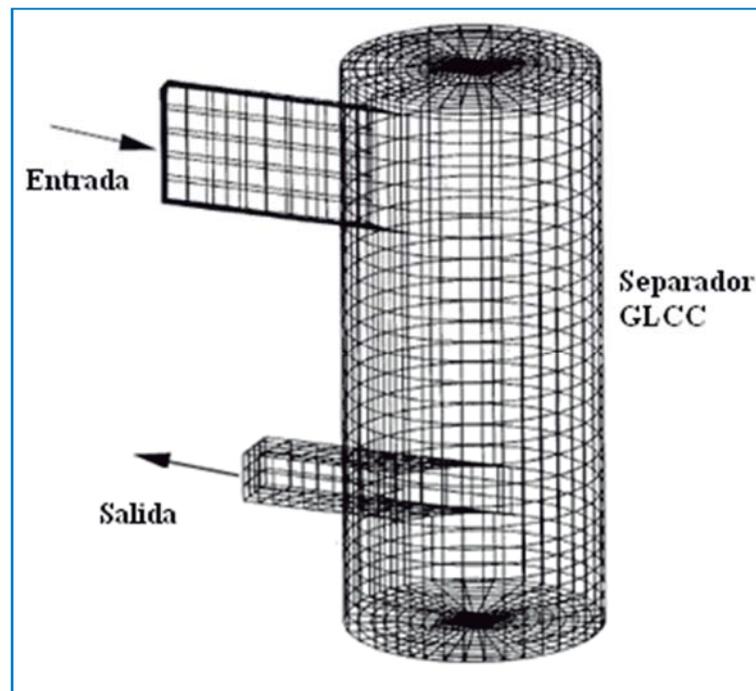


Figura 2.18 Configuración geométrica, mallado, del separador GLCC para la simulación CFD (Marti et al., 1996).

En la simulación se observó un flujo ascendente al centro del cilindro del GLCC, mientras que otro descendente en una región cerca de la pared, lo que se puede apreciar en la figura 2.19 que muestra vectores de velocidad del flujo.

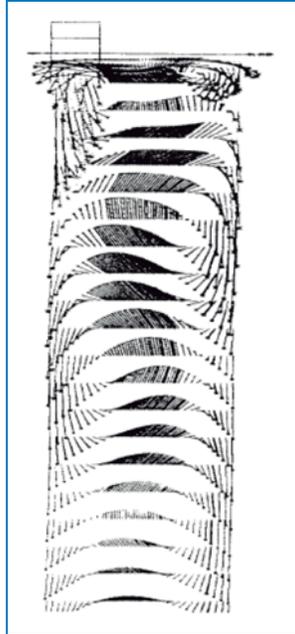


Figura 2.19 Vectores de velocidad en el separador GLCC obtenido con simulación CFD (Marti et al., 1996).

Otras observaciones de estas simulaciones fueron:

- El flujo es muy complejo y en su descripción debe incluir tres componentes de velocidad: tangencial (v_t), axial (v_z), y radial (v_r).
- La máxima velocidad tangencial se presenta justo en la entrada del cuerpo del separador y debido a la entrada tangencial se forma un vórtice, cuya longitud es aproximada a una relación L/d .
- Las simulaciones en 2D (considerando los tres componentes de velocidad) obtienen resultados similares con simulaciones 3D, que son mucho más complicadas, tediosas y requieren mayor capacidad de cómputo.
- La velocidad tangencial de los fluidos en el centro se mantiene casi constante, mientras que en la pared del cilindro de la parte inferior del cuerpo del separador GLCC presenta un deterioro que va de 5-7% por cada relación L/d .

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Las simulaciones CFD del flujo en el separador GLCC se agrupan en dos: monofásico con partículas dispersas (burbujas) y bifásico (Shoham & Kouba, 1998), las cuales fueron difíciles de desarrollar en relación al establecimiento de características como distribución de los fluidos en la sección de entrada y condiciones de frontera en las salidas (Erdal et al., 1997). De estas simulaciones se reportan limitaciones en cuanto a interacción de los fluidos y el efecto de la fase dispersa en el flujo de la fase continua (Shoham & Kouba, 1998).

De este tipo de simulaciones se han desarrollado análisis de sensibilidad del comportamiento del flujo en el que se considera la relación de la velocidad tangencial en la boquilla respecto a la velocidad axial v_{tis}/v_z , señalando que conforme se incrementa la relación v_{tis}/v_z se presenta una fuerte rotación de los fluidos, lo que mejora la separación, y con una reducción en la relación v_{tis}/v_z , ocurre un fuerte deterioro de la velocidad tangencial en dirección descendente causando arrastre de gas (Erdal et al., 1997). Los valores recomendados de la relación v_{tis}/v_z son entre 30 y 40. Otro resultado, es la predicción del diámetro del filamento de gas, abajo del vórtice, de forma precisa, así como su mecanismo de formación, que es mediante la continua integración de pequeñas burbujas que viajan radialmente lo suficiente (Erdal F.M., 1998 no publicado, en Shoham & Kouba, 1998).

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

En este capítulo se presenta el proceso general de cálculo para el diseño del separador compacto GLCC, que contempla tres etapas que son el dimensionamiento, el comportamiento de la operación y la evaluación de resultados. El capítulo se inicia presentando criterios de diseño, los cuales son las recomendaciones de las mejores prácticas detectadas, tanto para la configuración física como de ciertas características de operación.

Las primeras dos etapas del diseño presentan procesos ya establecidos. El proceso de dimensionamiento está enfocado a determinar la configuración geométrica de las secciones que componen el separador GLCC y el proceso del comportamiento de la operación busca determinar las condiciones normales de operación (bajo las dimensiones establecidas), con características como el nivel de líquido y colgamiento sin flujo neto de líquido. Cabe señalar que en ambos casos se requiere de información de producción de los fluidos, propiedades de los mismos y de los criterios de diseño.

La evaluación del funcionamiento es la forma en que se analiza que los resultados obtenidos sean adecuados para ciertas condiciones de producción por lo que de no cumplirse requerirá de realizar nuevamente los procesos de dimensionamiento y comportamiento de la operación hasta cubrir los objetivos buscados.

Para los procedimientos del diseño general, de dimensionamiento y comportamiento de la operación se proporcionan diagramas de flujo que buscan facilitar su entendimiento.

Finalmente, se concluye el capítulo con una descripción del simulador desarrollado en el programa TUSTP, el cual reúne los modelos mecánicos, criterios de diseño y los procesos descritos aquí, por lo que es una herramienta para facilitar el proceso de diseño.

3.1. Criterios de Diseño

Los criterios de diseño para el separador GLCC son establecidos en base a observaciones, experiencias y límites de aplicación, que son básicamente lecciones aprendidas de pruebas de laboratorio y campo, que deben ser consideradas para obtener un dimensionamiento y funcionamiento adecuado del separador GLCC. Los criterios de diseño más importantes por sección y característica de flujo se presentan a continuación:

Diámetro del cuerpo del separador GLCC: Las recomendaciones se realizan para la sección inferior y superior del separador GLCC (en donde el punto de división es la altura de la sección de entrada) que se basan en limitaciones o rangos permitidos de las velocidades de los fluidos (Gómez L. , 1998). El diámetro en la parte superior del cuerpo del separador GLCC, en el que domina la fase gaseosa, debe cumplir con la condición de que la velocidad del gas no supere la velocidad crítica ($v_{sg} < v_{g \text{ crít}}$), velocidad que inicia el arrastre de líquido, la cual es determinada con la ecuación 2.29 (Kouba & Shoham, 1996). Para que se cumpla la condición ($v_{sg} < v_{\text{crít } g}$) el diámetro con que se determino la velocidad crítica ($v_{\text{crít } g}$ o v_{a-n}) debe ser cambiado por un diámetro mayor, reduciendo así la velocidad del gas.

El diámetro de la parte inferior del separador GLCC, debe ser lo suficientemente pequeño para mantener la efectividad de la separación centrifuga y así evitar el arrastre de burbujas de gas en la corriente de salida del líquido, logrando separar burbujas de tamaño d_{100} . Un criterio mencionado al final del capítulo 2 y que se recomienda es que la relación entre la velocidad tangencial del líquido respecto a la velocidad axial, v_{tl}/v_{sl} , debe por lo menos aproximarse a un valor de 20 (Gómez, 1998) y de preferencia estar en un rango de 30 a 40 para asegura una separación eficiente y un tiempo de retención óptimo (Gómez et al., 1998), que fue estudiado inicialmente con simulación CFD.

La definición final del diámetro del cuerpo del separador GLCC corresponderá al que cumpla con estas condiciones y el procedimiento de diseño establecido más adelante.

Sección de entrada: Las recomendaciones son para la longitud, diámetro y ángulo de inclinación. Para este último, de un análisis de sensibilidad se determinó que en el rango de 25° a 30° se obtienen las máximas velocidades tangenciales (Gómez L. , 1998), lo que coincide con el ángulo de 27° que mejora la estratificación de las fases y las condiciones normales de operación sin arrastre de líquido, recomendado por Kouba et al. (1995). El diámetro de la sección de entrada debe ser lo suficientemente grande que ayude a estratificar los fluidos y el cual puede determinarse con la teoría de predicción del patrón de flujo de Taitel y Dukler (1975). La longitud de esta sección debe ser por lo menos de 3 a 5 [pies] de largo lo que ayuda a la pre-separación y estratificación de las fases.

Boquilla: El área de la boquilla debe ser lo suficientemente pequeña para asegurar que la velocidad tangencial del líquido de entrada sea lo suficientemente alta para mantener la efectividad de separación, la cual va en un rango de 15 [pies/s] a 20 [pies/s]. El área de la boquilla por lo general se expresa como un porcentaje de reducción de la sección de entrada y que va de 25-40% (Gómez L. , 1998). Tomar en consideración que exceder las velocidades tangenciales de entrada recomendadas puede producir un vórtice demasiado largo que cause prematuramente arrastre de fluidos. Por otro lado estas velocidades deben mantenerse por debajo de la velocidad de erosión de acuerdo a la norma API RP14E o cualquier otra aplicable (Gómez et al., 1999).

Longitud del cuerpo del separador GLCC (superior e inferior): La longitud de la parte superior del cuerpo del separador por arriba de la entrada debe ser lo suficientemente grande para evitar el arrastre de líquido en forma de cinta de líquido girando pegado a la pared o como gotas de líquido, la cual además permite que se contenga líquido en condiciones severas de flujo que en algunos casos evitara arrastre de líquido. El valor mínimo recomendado para esta longitud en base a experiencia es de 4 a 5 [pies] para diámetros de 3 a 6 [pg] (Shoham & Kouba, 1998).

La longitud de la parte inferior del cuerpo del separador por abajo de la entrada debe ser suficiente para mantener una columna de líquido por abajo del vórtice, para diferentes condiciones de flujo y tener el tiempo suficiente para la separación de burbujas de la fase del líquido y evitar que queden atrapadas y arrastradas en la corriente de salida de líquido.

El valor recomendado para la longitud en la parte inferior del cuerpo del separador GLCC generalmente es el mismo de la parte superior (para los diámetros de 3 a 6 [pg]), sin embargo, para diámetros de separadores más grandes o más pequeños se debe basar en el análisis de la trayectoria de la burbuja para esta sección o análisis de la trayectoria de la gota para la parte superior, que son contempladas en el procedimiento de diseño (Gómez et al., 1999).

Salidas de líquido y gas: La longitud exacta de las salidas del líquido y gas no son críticas, pero sus diámetros internos sí, los cuales deben de ser adecuados para el equipo que se coloque corriente abajo. Los diámetros internos deben de corresponder con las velocidades recomendadas de los fluidos, siendo de 4-40 [pies/s] para la salida de líquido y de 10-100 [pies/s] para la salida del gas. Es deseable que el punto de recombinación, para separadores en configuración de lazo, sea de 1 a 2 [pies] por abajo del plano de la entrada para diámetros de 3 a 6 [pg], sin embargo, para separadores GLCC con sistemas de control esto ya no es necesario (Gómez et al., 1999).

Nivel de líquido: El nivel de líquido (NL) es un parámetro muy importante para el correcto funcionamiento del separador GLCC, el cual requiere generalmente de un sistema de control activo para mantenerlo en un rango óptimo, con el que será necesario una estrategia de control que sea de rápida respuesta y que pueda manejar condiciones severas de producción, debido al corto tiempo de retención de los fluidos. La recomendación es un sistema de control retroalimentado en el que el controlador PID produce la mejor opción (Rojas Pérez, 2005). De datos de laboratorio se determinó que el gasto de líquido (expresado en v_{sl} en los datos), tiene mayor impacto en el nivel de líquido que el gasto de gas (v_{sg}), por lo que el control del nivel de líquido dependerá del primero (Wang S., 1997).

Forma del vórtice (interfase gas-líquido): En este aspecto sólo se hace la recomendación de usar el modelo de la forma del vórtice (interfase gas-líquido) presentado en los avances de los modelos mecanísticos, debido a que obtiene los mismos resultados y requiere una solución analítica mucho más sencilla que la solución numérica del modelo de la interfase gas-líquido, presentada en la base de los modelos mecanísticos (Gómez L. , 1998).

3.2. Procedimiento General de Diseño

En términos generales el diseño del separador compacto GLCC es un proceso cíclico, entre el dimensionamiento de la configuración física, el comportamiento de la operación y la evaluación del funcionamiento, hasta encontrar las condiciones óptimas de operación o requeridas. En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo general para determinar el diseño del separador compacto GLCC (Gómez et al., 1999).

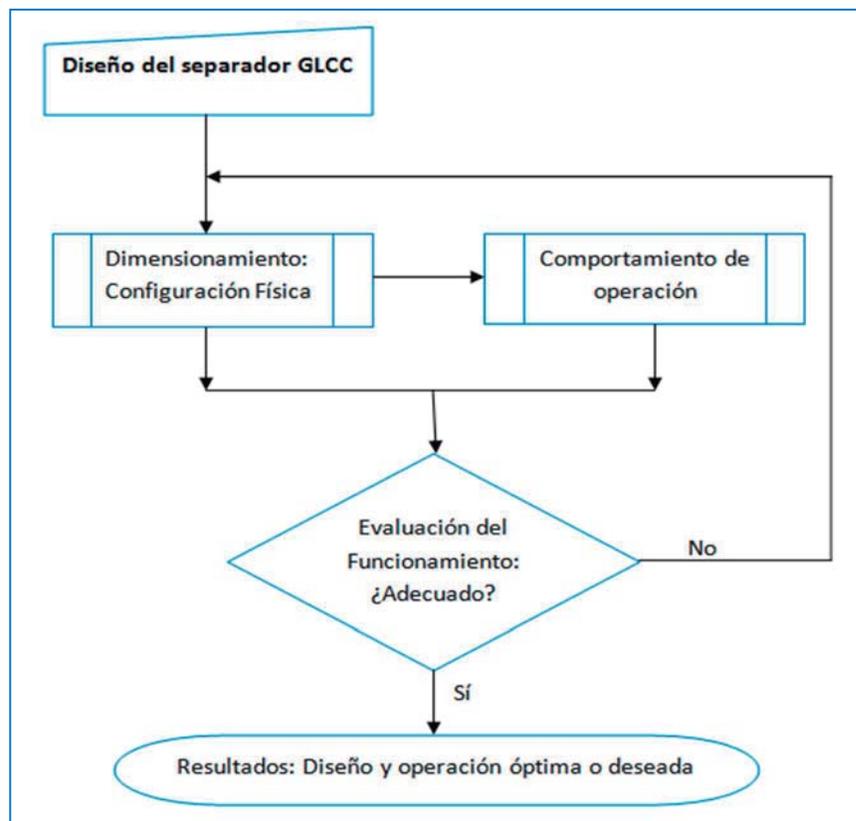


Figura 3.1 Diagrama de flujo del procedimiento general de diseño del separador GLCC.

Del diagrama anterior se observan dos etapas que son el dimensionamiento de la configuración física del separador GLCC y el comportamiento de operación del mismo, las cuales tienen un proceso establecido, que se basa en los modelos mecánicos y criterios de diseño. En el proceso de dimensionamiento se determina una configuración inicial del separador GLCC que posteriormente será modificada para obtener el diseño más apropiado. En el Apéndice B, se proporciona un formulario de los modelos mecánicos para facilitar la búsqueda de las ecuaciones.

En el proceso del comportamiento de operación del separador GLCC se hace uso de la configuración física obtenida previamente, obteniendo resultados como las condiciones normales de operación sin arrastre de líquido y nivel de líquido. Finalmente, una vez determinadas la configuración física y el comportamiento de operación se evalúa si los resultados obtenidos son los óptimos o los requeridos para nuestros objetivos, de lo contrario será necesario reiniciar el proceso. Los criterios de diseño en estos procedimientos son muy importantes ya que serán los que limiten o modifiquen ciertas características que afecten directamente el diámetro y/o longitud del separador GLCC, por ejemplo:

- Considérese que en los dos procedimientos es necesario conocer previamente las condiciones de producción de los fluidos, así como sus propiedades, dónde estás últimas de no conocerse deben de determinarse de correlaciones empíricas ya establecidas. En el libro de Garaicochea et al., (1991) se presentan las correlaciones para determinar las propiedades de los fluidos cuando no se cuenta con datos de laboratorio.
- Los datos necesarios de las condiciones de producción de los fluidos son el gasto de líquido, corte de agua, gasto de gas, presión y temperatura. De las propiedades de los fluidos la densidad relativa del gas y grados API del aceite son forzosos de proporcionar como datos, mientras que las demás propiedades como densidad del agua, viscosidades (aceite, agua y gas), tensiones superficiales (aceite y agua) y propiedades del líquido pueden ser determinadas de correlaciones (Gómez L. , 1998).

3.2.1. Dimensionamiento: Configuración Física

En este apartado se aborda un proceso establecido para determinar la configuración física preliminar del separador GLCC, el cual podría ser modificado con la evaluación del comportamiento de los fluidos para estas dimensiones.

La combinación y simplificación de los modelos presentados en el capítulo 2, proporcionan la forma en que se puede dimensionar el separador compacto GLCC, basado en el comportamiento del flujo multifásico en las diferentes regiones del sistema (Gómez, 1998 y Gómez et al., 1999). En este procedimiento de dimensionamiento del separador GLCC se divide el cuerpo del separador en cuatro regiones que se pueden apreciar en la figura 3.2, el cual incluye la región de entrada ($L_{entrada}/d_{sep}$), del vórtice (L_v/d_{sep}), de las gotas (L_{dt}/d_{sep}) y de las burbujas (L_{bt}/d_{sep}).

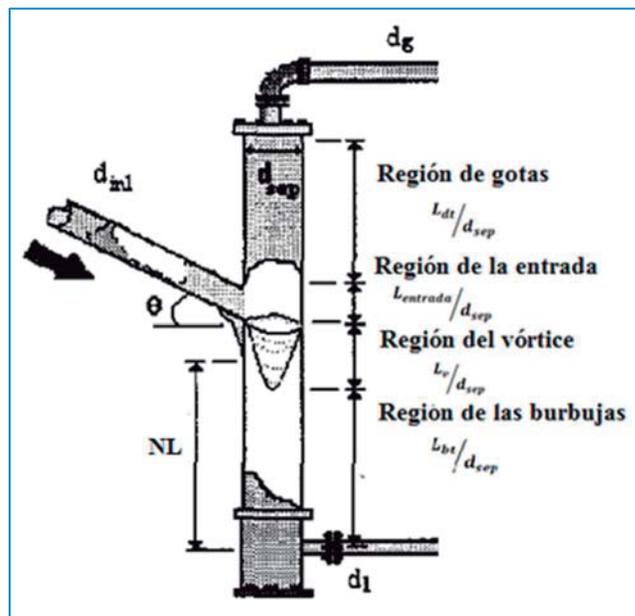


Figura 3.2 Representación de las regiones del separador GLCC consideradas para el dimensionamiento (modificada de Gómez et al, 1999).

Región de entrada ($L_{\text{entrada}}/d_{\text{sep}}$): Se encuentra cerca del centro del cilindro en dónde la sección de entrada se une al cuerpo del separador GLCC y los fluidos entran tangencialmente. Estos fluidos son acelerados conforme fluyen a través de la boquilla. En esta región es necesario determinar las velocidades tangenciales con que entran los fluidos mediante los modelos de análisis de entrada y boquilla, conociendo previamente el patrón de flujo, que se recomienda se busque obtener flujo estratificado.

Región del vórtice (L_v/d_{sep}): Es la región en dónde se forma la interfase gas-líquido. El modelo usado en esta sección es la de forma del vórtice, conociendo así su longitud, forma y altura respecto a la base del separador.

Región de gotas (L_{dt}/d_{sep}): La parte más alta del separador GLCC caracterizada por pequeñas gotas en una fase continua de gas. El modelo a usar es el modelo unificado de la trayectoria de la partícula, para el caso de gotas de líquido como fase dispersa y gas como fase continua, determinando el destino de las gotas.

Región de burbujas (L_{bt}/d_{sep}): La parte más baja del separador GLCC caracterizada por pequeñas burbujas en una fase continua de líquido girando. Se aplica el modelo unificado de la trayectoria de la partícula para el caso de burbujas como fase dispersa, determinando la longitud necesaria para separar las burbujas.

Para ambos casos de regiones de gotas y burbujas, dónde se usa el modelo unificado de la partícula se determina la longitud mínima de esa región, para un diámetro dado, en la que se evita el arrastre de líquido y gas, respectivamente, resultando en la relación óptima de L/d .

Procedimiento de dimensionamiento: Relación L/d

El proceso para determinar las relaciones L/d en cada sección y finalmente del cuerpo completo del separador GLCC se presenta en un diagrama de flujo en la figura 3.3 y posteriormente la descripción detallada de este procedimiento (Gómez et al., 1999).

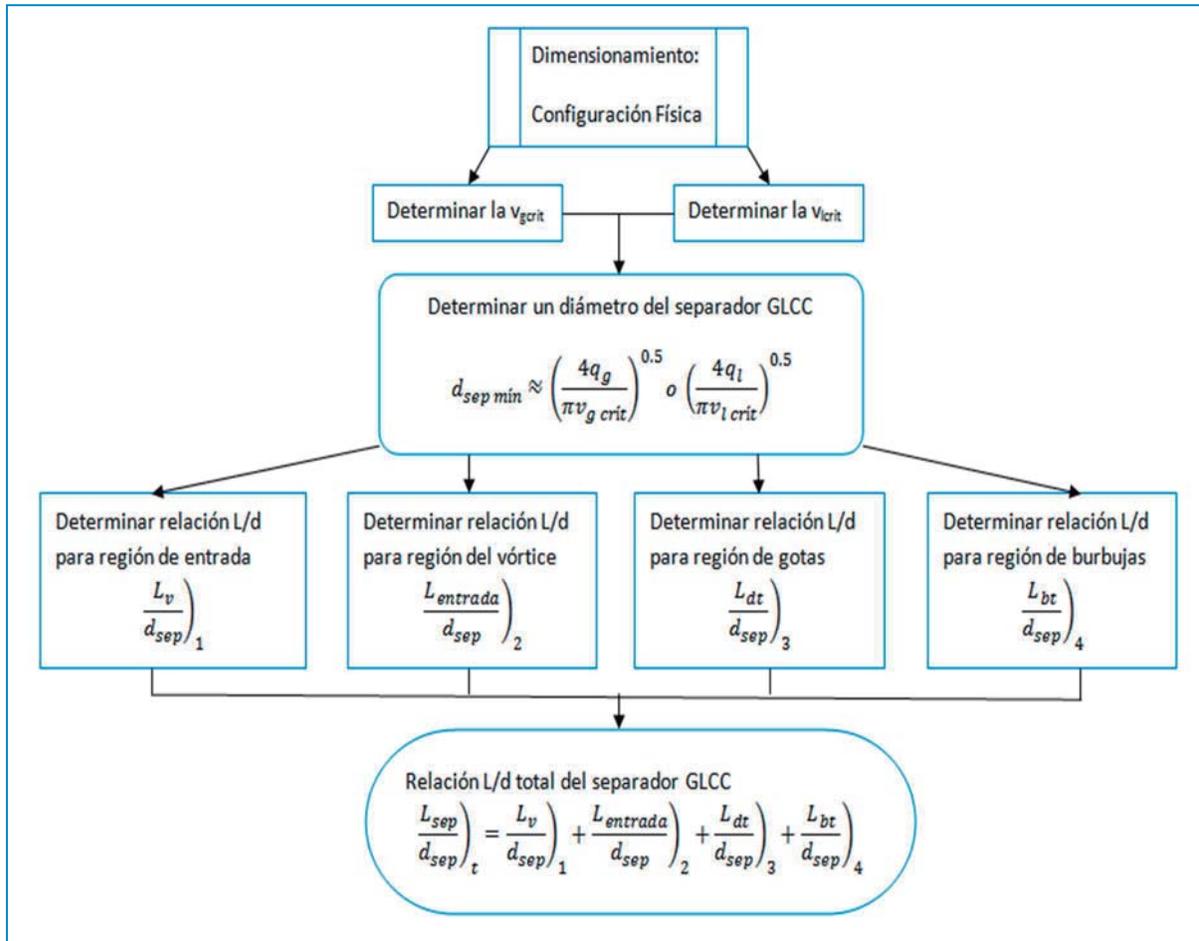


Figura 3.3 Procedimiento de dimensionamiento del separador GLCC.

1. Determinar un diámetro del separador GLCC, el cual como mínimo corresponderá a los diámetros obtenidos con la velocidad crítica del gas o velocidad crítica del líquido, según la región a analizar.

$$d_{sep\ min} \approx \left(\frac{4q_g}{\pi v_{g\ crit}} \right)^{0.5} \text{ o } \left(\frac{4q_l}{\pi v_{l\ crit}} \right)^{0.5} \quad (3.1)$$

De donde “q_g” y “q_l” son el gasto de gas y líquido dentro del cuerpo del separador GLCC, respectivamente.

La velocidad crítica de gas, que marca el inicio del arrastre de líquido en forma de pequeñas gotas determina el diámetro mínimo de la parte superior del cuerpo del separador, para ciertas condiciones de operación y su calculo se obtiene con el modelo mecanístico del inicio del flujo niebla-anular.

La expresión para determinar la velocidad crítica de gas es:

$$v_{g \text{ crit}} = 0.6809 \left(8\sigma \frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g^2} \right)^{0.25} \quad (2.27)$$

Por otro lado la velocidad crítica de líquido es aquella necesaria para mantener la efectividad de la separación centrífuga de las burbujas y que determina el diámetro mínimo de la parte inferior del cuerpo del separador GLCC.

Con el fin de mantener una relación de $v_{tl}/v_{sl}=40$ y una velocidad de líquido tangencial de 20 [pies/s], que son necesarios para mantener una longitud del vórtice adecuada y un movimiento rotatorio efectivo, se establece la velocidad de líquido crítica “ $v_{l \text{ crit}}$ ” igual a 0.5 [pies/s].

2. Determinar la relación L/d de la región del vórtice. Se recomienda como valor inicial de la longitud del vórtice entre 1 [pie] y 2 [pies] ($L_v \text{ supuesta}$). Considerando este valor, la velocidad tangencial del líquido en la entrada “ v_{tl} ”, que produce el vórtice y determina la trayectoria de la burbuja en la parte inferior del separador, está dada por la siguiente ecuación, tomada del modelo de la forma del vórtice (despeje de la ecuación 2.76):

$$v_{tl} = \sqrt{\left[\frac{8g(\rho_L - \rho_g)}{4\rho_g + (\rho_L - \rho_g)} \right] (L_v \text{ supuesta})} \quad (3.2)$$

La relación L/d en la región del vórtice se determina por:

$$\left(\frac{L_v}{d_{sep}} \right)_1 = \frac{L_v \text{ supuesta}}{d_{sep}} \quad (3.3)$$

La ecuación anterior es una forma recomendada de obtener la relación L/d para la región del vórtice, sin embargo, la forma estricta para determinarla es con el modelo de la forma del vórtice de la siguiente forma:

$$\left. \frac{L_v}{d_{sep}} \right)_1 = \frac{z(r=0) - z(r=R_{sep})}{d_{sep}} \quad (3.4)$$

De dónde:

$$z = L_{l1} - \frac{\rho_v \omega^2 d_{sep}^2}{4g} \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{2r}{d_{sep}} \right)^2 \right] \quad (2.72)$$

Las variables de la ecuación 2.72 son determinadas y descritas en el modelo de la forma del vórtice.

- Determinar la relación L/d de la región de entrada. Suponiendo una velocidad de entrada de la mezcla de 5-10 [pies/s] y la sección de entrada con un ángulo de inclinación de -27° , para asegurar la estratificación del flujo, el diámetro de la sección de entrada se calcula por:

$$d_{entrada} = \left[\frac{4(q_g + q_l)}{\pi v_{mezcla}} \right]^{0.5} \quad (3.5)$$

El área que ocupa la corriente de líquido en la boquilla se calcula como:

$$A_{l\ boquilla} = \frac{q_l}{v_{sl}} \cos \theta \quad (3.6)$$

Conociendo el diámetro de la sección de entrada y considerando los valores de la relación de áreas de la boquilla respecto a la entrada ($F_{boquilla} = A_{boquilla}/A_{entrada}$) de 0.25 a 0.5, el área total de la boquilla se calcula por:

$$A_{boquilla} = A_{entrada} * F_{boquilla} \quad (3.7)$$

La velocidad tangencial del gas “ v_{tg} ” que es responsable del destino de la trayectoria de las gotas, se obtiene como:

$$v_{tg} = \frac{q_g}{(1 - H_{l\ boquilla}) A_{boquilla}} \cos \theta \quad (3.8)$$

La longitud de la región de entrada del cuerpo del separador GLCC se expresa en relación con el diámetro de la tubería de entrada “ $d_{entrada}$ ” proyectado sobre la dirección axial del separador GLCC y está dado como:

$$\left(\frac{L_{entrada}}{d_{sep}}\right)_2 = \frac{L_{entrada}}{\cos \theta d_{sep}} = \left[\frac{4A_{entrada}}{\pi F_{boquilla}}\right]^{0.5} \frac{1}{\cos \theta d_{sep}} \quad (3.9)$$

4. Determinar la relación L/d de la región de gotas. Idealmente, la entrada de la mezcla se supone que está justo arriba de la corona del vórtice (figura 3.1), por lo que el análisis de la trayectoria de la gota se realiza justo arriba de la entrada para determinar la relación L_{dt}/d_{sep} de la región de gotas. La distancia mínima de la parte superior del cuerpo del separador es la distancia axial que viaja una gota de diámetro d_{100} , que es la gota de menor tamaño liberada en el centro del separador en la región de entrada, que será separada antes de que llegue a la pared del cilindro.

La velocidad final de caída radial y axial de la gota se puede determinar con las ecuaciones 2.75 y 2.77, respectivamente, del modelo de trayectoria unificada de la partícula considerando el gas como la fase continua y las gotas como la fase dispersa.

$$v_{pr}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p - \rho_c}{\rho_c}\right) \left(\frac{v_{ct}(r)^2}{r}\right) \left(\frac{d_p}{Cd}\right) \left(\frac{1}{v_{pd}(r)}\right) \quad (2.75)$$

$$v_{pz}(r) = \frac{(\rho_p - \rho_c)d_p^2}{18\mu_c} \quad (2.77)$$

El diámetro de la gota “ d_p ”, como ya se menciono anteriormente, es establecido y su posición axial, viajando hacia arriba, se expresa como:

$$\Delta Z_d)_i = \int \frac{-v_{sg} + v_{dz}}{v_{dr}(r)} dr \quad (3.10)$$

Finalmente la relación L/d de la parte superior del cuerpo del separador o región de gotas se determina de la distancia total que viaja la gota antes de llegar a la pared del separador y queda establecido como:

$$\left(\frac{L_{dt}}{d_{sep}}\right)_3 = \sum_{r=0}^{r=R_{sep}} |\Delta Z_d)_i| \frac{1}{d_{sep}} \quad (3.11)$$

5. Determinar la relación L/d de la región de burbujas. De la solución del modelo de trayectoria de la burbuja se considera que la base de la corona del vórtice es el punto de partida del análisis. Este análisis se desarrolla en la parte inferior del cuerpo del separador GLCC para determinar la relación de la región de gotas L_{bt}/d_{sep} (figura 3.2). La distancia mínima de la parte inferior del cuerpo del separador es la distancia axial que viaja una burbuja d_{100} (diámetro de burbuja entre 0.1 [mm] y 0.3 [mm]) liberada en la pared del separador para alcanzar el centro del cilindro. Con el mismo procedimiento de la trayectoria de la gota se calculan las velocidades finales axial y radial de la burbuja con las ecuaciones 2.75 y 2.77, respectivamente:

$$v_{pr}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p - \rho_c}{\rho_c} \right) \left(\frac{v_{ct}(r)^2}{r} \right) \left(\frac{d_p}{Cd} \right) \left(\frac{1}{v_{pd}(r)} \right) \quad (2.75)$$

$$v_{pz}(r) = \frac{(\rho_p - \rho_c) d_p^2}{18 \mu_c} \quad (2.77)$$

Por lo tanto, la posición axial de la burbuja viajando hacia abajo se determina como:

$$\Delta Z_b)_i = \int \frac{v_{sl} + v_{dz}}{v_{br}(r)} dr \quad (3.12)$$

Finalmente, la relación L/d en la parte inferior del cuerpo del separador GLCC o región de burbujas, es determinada con la distancia total que viaja la burbuja d_{100} antes de alcanzar el centro del cilindro y expresado como:

$$\left(\frac{L_{bt}}{d_{sep}} \right)_4 = \sum_{r=0}^{r=R_{sep}} |\Delta Z_b)_i| \frac{1}{d_{sep}} \quad (3.13)$$

6. Se obtiene la relación L/d total del separador GLCC, que corresponde al cuerpo del separador “ L_{sep}/d_{sep} ”, sumando las relaciones de longitud/diámetro de la región de gotas, de la entrada, del vórtice y la de burbujas, resultando en:

$$\left(\frac{L_{sep}}{d_{sep}} \right)_t = \left(\frac{L_v}{d_{sep}} \right)_1 + \left(\frac{L_{entrada}}{d_{sep}} \right)_2 + \left(\frac{L_{dt}}{d_{sep}} \right)_3 + \left(\frac{L_{bt}}{d_{sep}} \right)_4 \quad (3.14)$$

7. Los diámetros de las salidas de líquido y gas se pueden determinar asumiendo la altura del punto de recombinación de la salida de líquido 1[pie] menor que la suma de la longitud de la trayectoria de la burbuja y longitud del vórtice. Las pérdidas por fricción se obtienen como:

$$\phi_L - \phi_g = (\rho_L - \rho_g)gL_{eq} - \rho_l \frac{f_1 L_{eq} v_{sl}^2}{d_{sep}} - (\rho_L - \rho_g)g[(L_v + L_{bt}) - 1] \quad (3.15)$$

De esta ecuación 3.15 los parámetros geométricos corresponden a la figura 3.2 y cualquier otra nomenclatura se puede determinar con el apéndice A. ϕ_L y ϕ_g , las pérdidas por fricción en las salidas de líquido y gas, respectivamente, se obtienen como:

$$\phi_L = \left[\sum \rho_L \frac{8f_i L_i}{\pi^2 d_i^5} q_i^2 + \sum \rho_l \frac{8k_i}{\pi^2 d_i^4} q_i^2 \right]_l \quad (3.16)$$

$$\phi_g = \left[\sum \rho_g \frac{8f_i L_i}{\pi^2 d_i^5} q_i^2 + \sum \rho_g \frac{8k_i}{\pi^2 d_i^4} q_i^2 \right]_g \quad (3.17)$$

Los valores de los diámetros de las salidas de líquido y gas se determinan iterativamente hasta que la ecuación 3.15 se satisfaga.

3.2.2. Comportamiento de la Operación

La forma de determinar el comportamiento de la operación del separador GLCC fue publicado por Arpandi et al. (1996) y hace uso de los modelos mecanísticos base, presentados en el capítulo anterior, determinando las condiciones normales de operación sin arrastre de líquido y el nivel de líquido.

Debe tenerse en cuenta que las condiciones normales de operación sin arrastre de líquido son un conjunto de pares de velocidades de los fluidos (v_{sg} y v_{sl}) en los que se inicia el arrastre del líquido, por lo que se cubrirán amplios rangos de velocidades de los fluidos y como recomendación personal tomar en cuenta, como se mencionó en los criterios de diseño, que las velocidades del gas van de 10-100 [pies/s] y las del líquido de 4-40 [pies/s], sin embargo, no se debe cubrir todo este rango ya que dependerá de las condiciones de operación reales, buscando que este punto sea la parte central del análisis.

Para determinar las condiciones normales de operación sin arrastre de líquido se requiere determinar características como el nivel de líquido y colgamiento sin arrastre de líquido por lo que estas serán parte de los resultados.

Procedimiento del comportamiento de operación

En este procedimiento se usan datos del dimensionamiento como la trayectoria de la burbuja y la configuración obtenida del separador GLCC, además de las condiciones de producción de los fluidos y sus propiedades. En la figura 3.4 se presenta un diagrama del proceso para determinar el comportamiento de operación del separador GLCC, seguido de la descripción detallada del mismo.

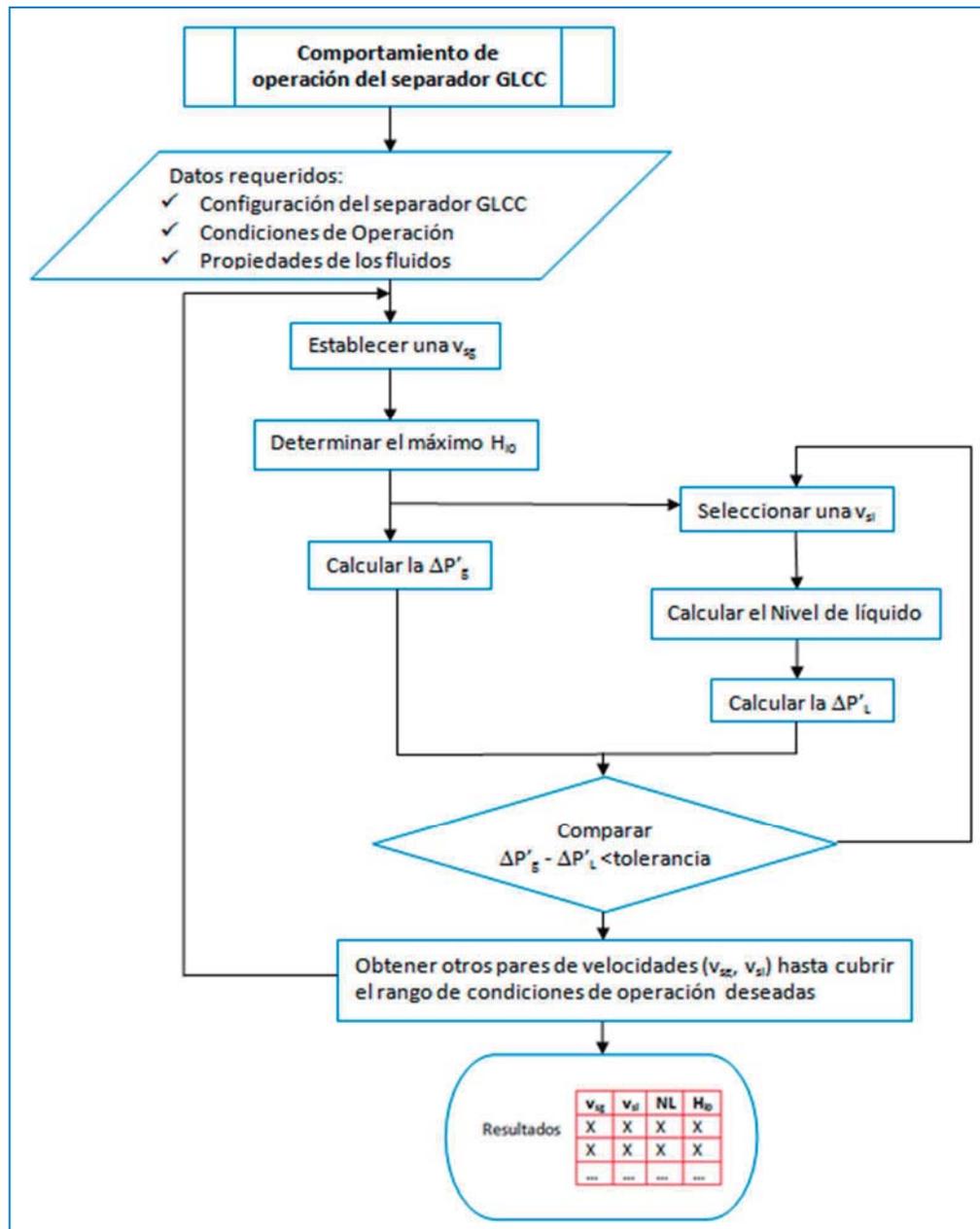


Figura 3.4 Procedimiento para determinar el comportamiento de la operación del separador GLCC.

1. Establecer una velocidad superficial del gas.
2. Determinar el máximo colgamiento de líquido que se puede tolerar en la parte superior del separador GLCC utilizando el modelo de colgamiento sin flujo neto de líquido con las ecuaciones 2.15 y 2.16.

$$H_{L0} = \left[1 - \left(\frac{v_{sg}}{1.15v_{sg} + 0.35 \sqrt{g d_s \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_L} \right)}} \right) \right] \left(1 - \frac{L_d}{L_{g1}} \right) \quad (2.15)$$

$$L_d = \frac{1}{\frac{2g}{v_{sg}^2} - \frac{C_d}{2} (\rho_g v_{sg})^2 \frac{3}{32 \rho_L \sigma g}} \quad (2.16)$$

3. Determinar la densidad de la mezcla en esta región:

$$\rho_{m0} = \rho_L H_{L0} + \rho_g (1 - H_{L0}) \quad (3.18)$$

4. Determinar la caída de presión en la salida de gas desde la entrada hasta la salida. Las caídas de presión gravitacionales y por fricción en la parte superior del separador GLCC deben incluir el efecto de la presencia de la fase líquida en las condiciones de colgamiento sin flujo de líquido, como se muestra:

$$\Delta P'_{g1} = - \frac{f_{g0} \rho_g v_{g0}^2 (L_{g1} - L_d)}{2 d_{g0}} - \frac{f_g \rho_g v_g^2 L_d}{2 d_s} - \rho_{m0} g (L_{g1} - L_d) \quad (3.19)$$

Para determinar la caída de presión por fricción se debe considerar la reducción del área en la que fluye el gas por la presencia de líquido. La reducción del diámetro se obtiene como:

$$d_{g0} = d_s \sqrt{1 - H_{l0}} \quad (3.20)$$

Y el incremento de la velocidad en la región superior del separador “ v_{g0} ” se puede obtener con la ecuación 2.13. El número de Reynolds es por lo tanto:

$$Re_{g0} = \frac{\rho_g v_{g0} d_{g0}}{\mu_g} \quad (3.21)$$

La rugosidad de la interface se supone igual al espesor equivalente del filamento anular “ δ ” obteniendo un factor de fricción de la forma:

$$f_{g0} = f_{g0} \left(Re_{g0}, \frac{\delta}{d_{g0}} \right) \quad (3.22)$$

Donde el espesor equivalente del filamento está dado por:

$$\delta = \frac{d_s - d_{g0}}{2} \quad (3.23)$$

Así la caída de presión total en la salida de gas es:

$$\Delta P'_g = \rho_g g L_{g3} - \phi'_g + \Delta P'_{g1} \quad (3.24)$$

Donde:

$$\phi'_g = \frac{\rho_g}{2} \left(\sum_{i=2}^n \frac{f_i L_i v_i^2}{d_i} + \sum_{i=1}^n K_i v_i^2 \right)_g \quad (3.25)$$

5. Seleccionar una velocidad superficial de líquido. Esta cambiará hasta que se llegué a encontrar la velocidad con la que se inicie el arrastre de líquido.
6. Determinar la caída de presión para el líquido con el que consecuentemente el nivel líquido (NL) será determinado. El primer paso es obtener la longitud de la región de gotas usando la ecuación 2.16:

$$L_d = \frac{1}{\frac{2g}{v_{sg}^2} - \frac{C_d}{2} (\rho_g v_{sg})^2 \frac{3}{32 \rho_L \sigma g}} \quad (2.16)$$

El siguiente paso depende de las velocidades superficiales:

- a. Para bajas velocidades superficiales de gas (y altas velocidades superficiales de líquido) el líquido se presenta en la parte superior del separador como colgamiento sin flujo de líquido. Para estas condiciones donde $L_d < L_{g1}$, el $H_{L0} > 0$ y el nivel de equilibrio de líquido se localiza arriba de la entrada y se determina como:

$$L'_{l1} = L_{in} + H_{L0} \rho_L g (L_{g1} - L_d) \quad : \text{ Para } L_d < L_{g1} \quad (3.26)$$

Note que en el lado derecho del segundo término es una altura equivalente al colgamiento sin arrastre de líquido obtenida con el colgamiento sin flujo neto de líquido de la ecuación 2.14.

- b. Para el caso de altas velocidades superficiales de gas (y bajas velocidades superficiales de líquido) y para condiciones de $L_d \geq L_{g0}$ y $H_{L0} \approx 0$, el nivel de equilibrio de líquido se ubica abajo de la entrada calculada como:

$$L'_{l1} = L_{in} - (L_{in} - L_{l3}) \left(\frac{v_{sg} - v_{b0}}{v_{g\text{ crit}} - v_{b0}} \right) \quad : \text{ Para } L_d \geq L_{g1} \quad (3.27)$$

Donde v_{b0} es la velocidad de nulo colgamiento de líquido, como se explicó en la ecuación 2.16 y $v_{g\text{ crit}}$ es la velocidad crítica de gas necesaria para iniciar el arrastre de líquido en la forma de pequeñas gotas de líquido, como:

$$v_{g\text{ crit}} = 0.6809 \left(8\sigma \frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g^2} \right)^{0.25} \quad (3.28)$$

Note que en la ecuación para altas velocidades superficiales de gas, tanto v_{b0} como v_{ct} se determinan con el modelo de colgamiento sin flujo neto de líquido e inicio de flujo anula-niebla.

7. Determinar la caída de presión en la salida de líquido:

$$\Delta P'_L = \rho_L g (L_{l1} - L_{l3}) + \rho_g g (L_{in} - L_{l1}) - \phi'_L \quad (3.29)$$

Donde:

$$\phi'_L = \frac{\rho_l}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i L_i v_i^2}{d_i} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i v_i^2}{d_i} \right)_L \quad (3.30)$$

8. Las pérdidas de presión en la salida de líquido y la salida de gas deben ser iguales. Verificar la convergencia.

$$\Delta P'_L - \Delta P'_g < \textit{tolerancia} \quad (3.31)$$

9. Repetir los pasos del 5 al 9 con un nuevo valor de velocidad superficial de líquido hasta alcanzar la convergencia. Se puede usar el método de bisección para encontrar la solución. Con lo anterior se obtiene un par de velocidades superficiales de líquido y gas en las condiciones de operación sin arrastre de líquido.

10. Repetir el procedimiento completo para diferentes valores de velocidades superficiales para obtener las condiciones de operación sin arrastre de líquido completas.

3.2.3. Evaluación del Funcionamiento

De acuerdo con el diagrama del procedimiento general de diseño del separador GLCC, después de obtener la configuración física y el comportamiento de la operación se procede a evaluar los resultados, los cuales están agrupados en velocidades, región del vórtice, interfase gas-líquido (forma del vórtice), trayectoria de la burbuja, condiciones de operación sin arrastre de líquido y características de las salidas de los fluidos (Gómez, 1998). Los resultados que agrupan las categorías mencionadas se describen a continuación:

Velocidades: Reúne las siguientes velocidades; crítica, superficial de gas, superficial de líquido, superficial del gas en la entrada, superficial de líquido en la entrada, tangencial en la boquilla y de erosión.

Forma del vórtice: Contempla las siguientes características, en la que previamente se conoce el patrón de flujo; colgamiento de líquido en la sección de entrada, colgamiento de líquido en la boquilla, velocidad en la base del vórtice, diámetro de la burbuja, nivel de líquido en la boquilla, longitud del vórtice, altura del vórtice y altura de la trayectoria de la burbuja, donde estas tres ultimas medidas se muestran esquemáticamente en la figura 3.5.

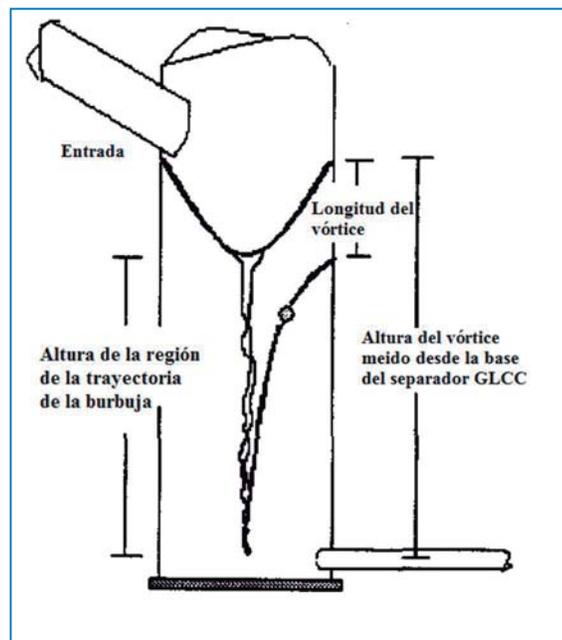


Figura 3.5 Referencia para mediar alturas en el modelo del vórtice (Gómez, 1998).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

En la forma del vórtice se obtiene además el perfil del vórtice graficando los resultados de la posición axial para cada radio dado. Considerar que la posición axial es la distancia vertical medida desde la parte más alta del vórtice (corona del vórtice). La posición radial es la distancia desde el centro del separador GLCC hacia la pared del cilindro.

Trayectoria de la burbuja: Los resultados se muestran gráfica y numéricamente, en dónde los datos son la posición axial y radial que experimenta la burbuja. Considerar que la posición axial, es la distancia vertical medida desde la base del separador GLCC a la base del vórtice. La posición radial es la distancia desde el centro del separador GLCC hacia la pared del cilindro.

Condiciones de operación sin arrastre de líquido: Se presentan en una tabla los datos de las velocidades superficiales del gas y el líquido, en las que inicia el arrastre de gotas de líquido, así como el colgamiento de líquido sin flujo neto de líquido y el nivel de líquido. Se grafican estos resultados y se representa las condiciones normales de operación en la que se debe incluir el punto de operación real del separador GLCC.

Características de las salidas de los fluidos: Presentan los detalles de los segmentos de las tuberías como diámetros, velocidades, factores de fricción, coeficientes de resistencia y caídas de presión.

3.3. Simulador GLCC V7.8

Los procedimientos descritos previamente, así como los modelos mecánicos que caracterizan el comportamiento del flujo multifásico en el separador GLCC han sido reunidos en el software GLCC V7.8 desarrollado en el programa TUSTP en una plataforma EXCEL/VBA que se puede apreciar en la figura 3.6 (Godoy-A. et al., 2008). Los beneficios que se tienen con este simulador es que elimina el extenso y laborioso trabajo de solución de los modelos, algunos de ellos numéricos y debido al procedimiento de diseño, que modifica características como diámetro y longitud del separador, volver a repetir los modelos extensos y laboriosos para otras condiciones

A partir de los años en que se publica los artículos de los modelos mecánicos mejorados y el procedimiento de diseño, que incluían la publicación del software, se incrementa considerablemente el número de separadores GLCC implementados alrededor del mundo, lo que nos puede dar una idea de la confiabilidad de estos modelos para ser extrapolados a diferentes condiciones de operación y aplicaciones.

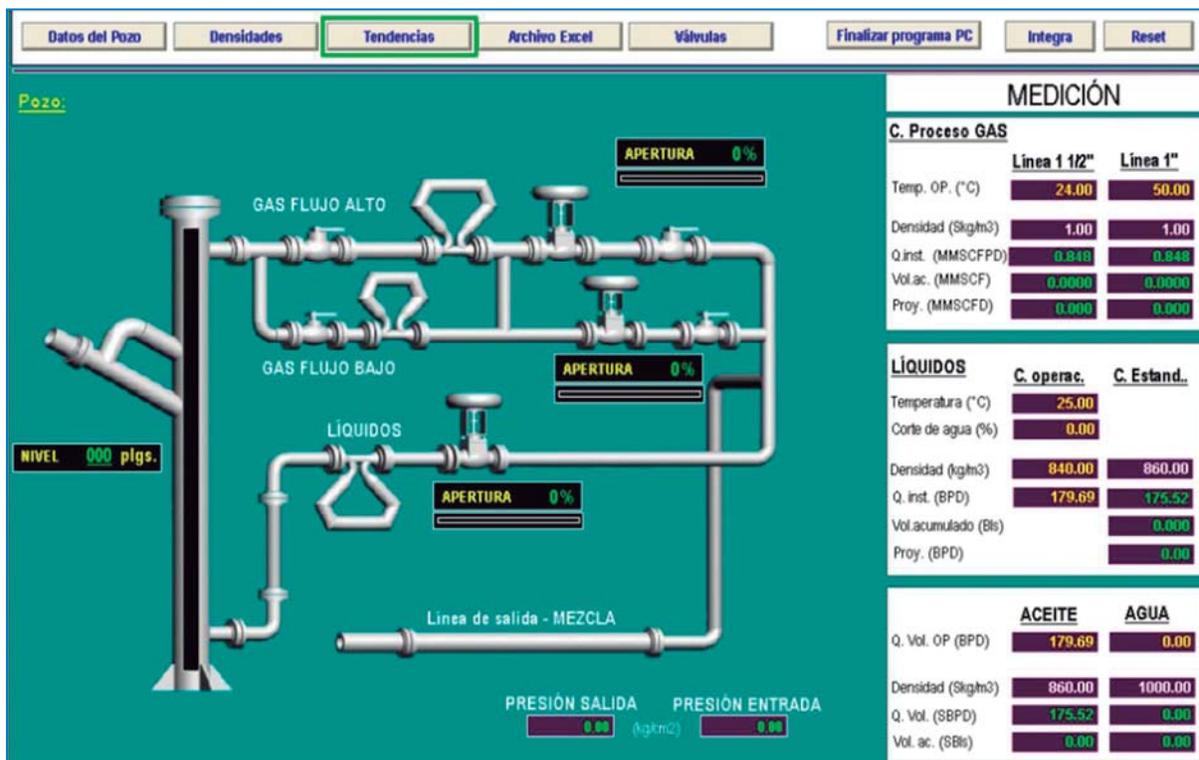


Figura 3.6 Interface del software GLCC V7.8 (Godoy A., et al., 2008).

CAPÍTULO 4. APLICACIONES

Las aplicaciones del separador compacto GLCC contabilizan más de 4000² en los 18 años que lleva el programa TUSTP, lo que nos da una idea, además de su viabilidad, de la tendencia ascendente de implementaciones que se puede apreciar en la figura 4.1. Las aplicaciones son variadas y como se puede observar son bastantes y su número seguirá aumentando, por lo que en este capítulo se documentan las más importantes que se han usado, incluyendo las pruebas de laboratorio y campo, las realizadas en México y las submarinas implementadas en aguas profundas, que por sus dimensiones, novedad y potencial son muy importantes de describir.

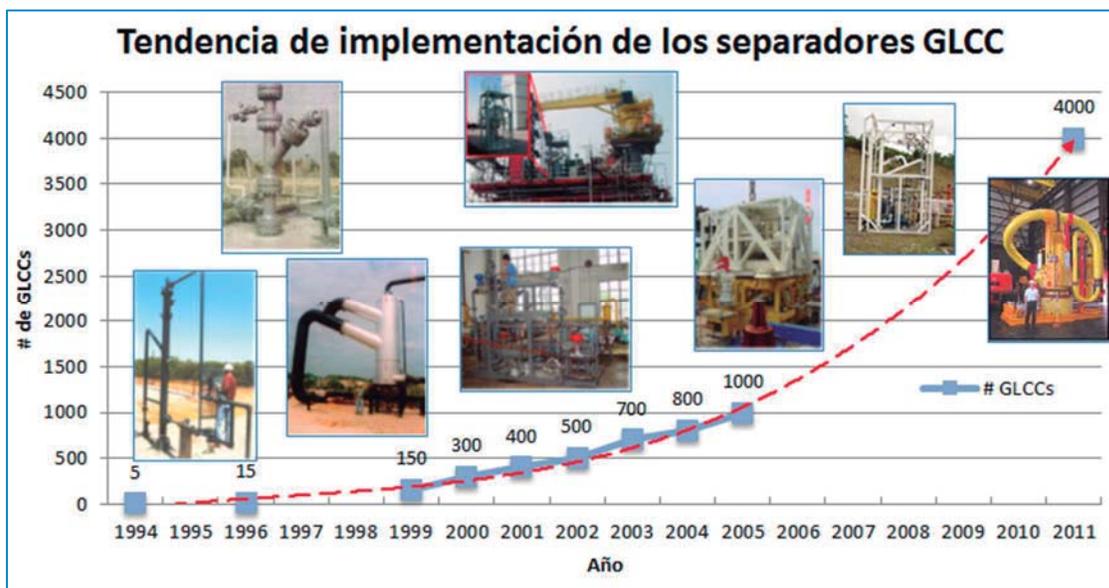


Figura 4.1 Tendencia de la implementación de separadores compactos GLCC (modificada de Kouba G., et al., 2006).

La información de pruebas, aplicaciones y evaluaciones de ciertos resultados que ha tenido el separador compacto GLCC, que se presenta a continuación, será de utilidad para los ingenieros petroleros para entender y considerar la tecnología de separación compacta GLCC en sus aplicaciones de campo como una alternativa a los separadores convencionales, que por supuesto deberá ser evaluada con los objetivos de producción deseados.

² De www.tustp.org, se accedió en septiembre del 2011.

4.1 Pruebas de Laboratorio y Campo

Para el caso específico del separador compacto GLCC el desarrollo de pruebas, ya sea de laboratorio o campo, se realizan con el objetivo de conocer en condiciones controladas su funcionamiento. La información obtenida de las pruebas, complementada con teoría que describe los fenómenos físicos que se presentan en la separación, permitió desarrollar los modelos mecánicos que pueden ser extrapolados a diferentes condiciones, los cuales ya fueron presentados en el capítulo 2 sobre el marco teórico del diseño.

Adicionalmente se muestran algunos resultados y evaluaciones de las pruebas, que en general, demuestran que el separador GLCC es una alternativa confiable.

4.1.1 Primeros prototipos de laboratorio

El desarrollo de las primeras pruebas de laboratorio del separador GLCC fueron desarrolladas a mediados de los años 90's por la compañía Chevron y la Universidad de Tulsa, a través del programa TUSTP, con 3 lazos de medición, con las características que se muestran en la tabla 4.1, mostrándose además en la figura 4.2 una imagen de un prototipo usado. La aplicación que se dio a estos separadores fue con la finalidad de investigación y medición de parámetros, como nivel de líquido y arrastre de fluidos. Los resultados obtenidos permitieron establecer la forma en que se evalúa el funcionamiento del separador, la influencia del nivel de líquido y los primeros resultados de evaluación del separador GLCC (Kouba, Shoham, & Shirazi, 1995).

Características	Datos y condiciones
Fluidos	Agua y Aire
Diámetros de los separadores	1, 2 y 3 [pg]
Altura de los separadores	7 y 8 [pies]
Presiones	30-65 [lb/pg ² abs]
Gasto de líquido	400 [bpd]
Gasto de gas	60 [mpcd]

Tabla 4.1 Características de los primeros prototipos de laboratorio del separador GLCC (Kouba et al., 1995).



Figura 4.2 Lazo de Medición desarrollado por la Universidad de Tulsa (Kouba, et al., 1995).

4.1.2 Primeros prototipos de Campo

La compañía Chevron construyó e instaló un prototipo en el campo Fox Deese Springer, al sur de Oklahoma (figura 2.1), con un costo de manufactura e instalación aproximado de \$2500 USD (Kouba, Shoham, & Shirazi, 1995). El desarrollo de este prototipo se realizó para demostrar la aplicabilidad del separador, aunque aún no se contaba con el completo entendimiento del comportamiento hidrodinámico de los fluidos, sin embargo, al igual que los prototipos iniciales de laboratorio fue de gran ayuda para investigación y medición de parámetros.

Las características de este separador se presentan en la tabla 4.2 siguiente:

Características	Datos y condiciones
Fluidos	Agua y Aire
Diámetro del separador	3 [pg]
Altura del separador	7 [pies]
Entrada	3 [pg]
Boquilla	25% de la entrada
Salida de líquido	2 [pg]
Salida de gas	2 [pg]

Tabla 4.2 Características del separador GLCC de prueba (Kouba et al., 1995).

4.1.3 Evolución de las pruebas

Las pruebas y aplicaciones en campo fueron evolucionando gradualmente a condiciones de operación más comunes de campo. Recientemente, entre los años 2002 y 2007, las pruebas fueron realizadas con fluidos hidrocarburos (tanto líquidos como gaseosos), presiones entre 200 y poco más de 1500 [lb/pg² abs], gastos de líquido de 500-40000 [bpd] y gastos de gas entre 250 y 25000 [mpcd], confirmando nuevamente la adecuada operación del separador GLCC (Kouba et al., 2006). Las descripciones de algunas de estas pruebas se presentan a continuación:

Sistema de control

Las pruebas fueron realizadas en las instalaciones del campo Texaco Humble con el objetivo de probar estrategias de control convencionales y una nueva “óptima” para condiciones intermitentes de producción, como el flujo tipo bache (Wang et al., 2010). El separador GLCC usado es de 6 [pg] de diámetro y 12 [pies] de alto, con entrada simple, como se puede observar en la figura 4.3.



Figura 4.3 Separador GLCC de prueba de campo en el campo Humble (Wang et al., 2010).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Las pruebas se realizaron con fluidos ligeros y medianos (29 y 21 °API, respectivamente), agua y gas natural, así como con variaciones en las condiciones de operación como se muestran en la tabla 4.3 (Kouba et al., 2006):

Variable	Aceite 29°API	Aceite 21°API
q_L [bpd]	1000-8000	500-6000
q_g [mmpcd]	0.25-2.3	0.25-2
Corte de agua [%]	0, 20, 40, 60, 80, 100	0, 20, 60, 80
P [lb/pg ² man]	245-250	248-275
T [°F]	100-144	119-144

Tabla 4.3 Condiciones de operación de las pruebas hechas al separador GLCC en el campo Humble (Kouba et al., 2006).

Los resultados de estas pruebas llevaron a comprobar el sistema de control “óptimo” propuesto para condiciones extremas de flujo bache, manteniendo un nivel de líquido de 65 [pg] con ligeras variaciones, presentando un arrastre máximo de 5% a la salida del líquido (Wang et al., 2010).

Alternativa para gas húmedo

Estas pruebas se realizaron en la Colorado Engineering Experimental Station Inc. (CEESI), con un separador de doble entrada y de 6 [pg] de diámetro del cuerpo del separador. El objetivo de estas pruebas estuvo enfocado a evaluar el arrastre de líquido de un separador GLCC convencional y una configuración del separador GLCC para gas húmedo, el cual está equipado con dos extractores anulares de niebla colocados arriba y abajo de la entrada superior, como se muestra en la figura 4.4.



Figura 4.4 Estación CEESI para prueba en campos de gas húmedo (Kouba, et al., 2006).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Las condiciones de operación generales de las pruebas fueron el uso de fluidos hidrocarburos, gastos de líquido de 900 [bpd], gastos de gas de 25 [mmpcd] y presiones de 200 a 1000 [lb/pg²]. Los resultados de las pruebas demostraron que el separador GLCC para gas húmedo, reduce significativamente la cantidad de arrastre de líquido, encontrado cuando se opera en condiciones más allá de las normales.

Equipo submarino

La prueba fue reportada por Haheim y Gaillard (2009), en la que se documentan pruebas realizadas a un sistema de separación y bombeo submarino para futura implementación en campo, potencialmente en ese entonces y hoy hecho una realidad, con el objetivo de evaluar su aplicabilidad y determinar los requerimientos del sistema de control. Las pruebas fueron realizadas en un laboratorio en Winterthur, Suiza, en el año 2007, el cual consistió en un separador GLCC, una bomba multifásica (equipada con un variador de velocidad VSD, Variable Speed Driver), un sistema de control, lazo de reciclado de fluidos (de la descarga de bomba a la corriente de entrada al separador GLCC) y una válvula de presión en la salida de la bomba (para simular la contrapresión del riser). El separador GLCC se muestra en la figura 4.5 siguiente:



Figura 4.5 Separador GLCC de prueba para aplicación submarina (Haheim & Gaillard, 2009).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Las condiciones de diseño del separador GLCC se presentan en la tabla 4.4:

Características	Datos y condiciones
Fluidos	Agua y Aire
Presiones de operación	580 [lb/pg ²]-1450[lb/pg ²]
q _l (esperado del campo)	40000 [bpd]
Fracción de gas [%]	50%
Peso vacío	1900 [kg]
Peso lleno (agua)	4400 [kg]

Tabla 4.4 Condiciones de diseño del separador GLCC para pruebas en laboratorio e implementación futura submarina de campo (Haheim & Gaillard, 2009).

Las pruebas realizadas a este separador GLCC fueron la evaluación del manejo de baches, variación de flujos para determinar el arrastre de líquido y el control del nivel de líquido con una nueva estrategia, que consistió en utilizar un variador de velocidad en la bomba y con esto mantener el nivel de líquido en el punto establecido. Los criterios de operación del nivel de líquido establecidos del separador GLCC para el sistema de control se muestran en la figura 4.6 siguiente:

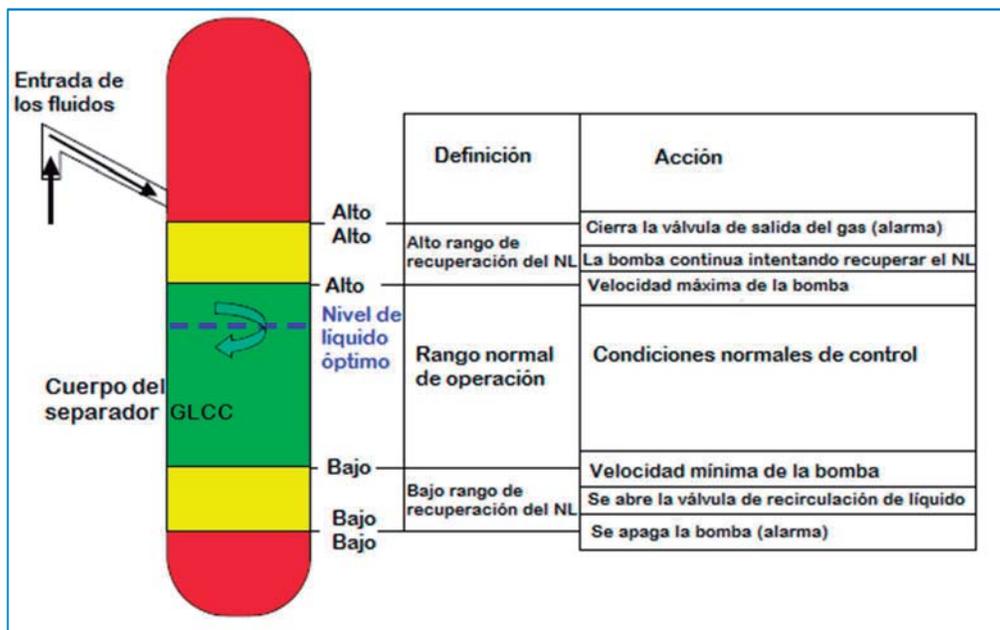


Figura 4.6 Consideraciones de las pruebas de control dependiendo del nivel de líquido en el separador GLCC para aplicación submarina (modificada de Haheim & Gaillard, 2009).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- El manejo de baches fue realizado exitosamente, aunque se considera que el tiempo de reacción del sistema de control no fue el óptimo y que parte del éxito del manejo de baches podría atribuirse a que el sistema no fue operado en sus condiciones máximas.
- El arrastre de líquido a la entrada de la bomba, presentado con las condiciones máximas de operación de la prueba (25000 [bpd] de líquido y 64% de fracción de gas) fue del 2%, lo que fue un muy buen resultado.
- El control del nivel de líquido tuvo un buen desempeño al probar la nueva estrategia de control, al variar la velocidad de la bomba para mantener el nivel de líquido.

Finalmente de estas pruebas se obtuvo la evaluación del funcionamiento básico del concepto de separación y bombeo submarino, lo que a futuro requirió más investigación, no disponible, enfocada a la maduración del bombeo, funcionamiento del separador con fluidos reales en condiciones transitorias y establecer los requisitos finales del sistema de control para aplicación en campo.

4.2 Separadores GLCC de mayor implementación

Las aplicaciones de mayor implementación del separador GLCC han sido las de lazo de separación-medición multifásico, eliminador de gas, eliminador de líquido para campos de gas húmedo y sistema de manejo de baches, los cuales se describen a continuación:

4.2.1 Lazo de separación-medición multifásico

Ésta ha sido la aplicación con mayor número de separadores GLCC instalados en campo y la que incluye el separador GLCC más grande del mundo, que se puede observar en la figura 4.7. Las dimensiones de este separador son 60 [pg] de diámetro y 20[pies] de alto, con la función de separador primario y medidor. Las condiciones de operación fueron 170 [lb/pg²] y 260 [°F] para gastos de 160 000 [bpd] de aceite y 70 [mmpcd] de gas. Este separador cuenta con medidores monofásicos y válvulas de control en las salidas tanto de líquido como de gas y un sistema de control para regular el nivel de líquido.



Figura 4.7 Medidor multifásico más grande del mundo ubicado en Minas, Indonesia (Kouba et al., 2006).

Otra aplicación con el objetivo de separar y medir fue realizada en un campo de gas húmedo e instalada en una plataforma en China por la compañía CNOOC. Las dimensiones son de 12 [pg] de diámetro y 12 [pies] de alto con una configuración de entrada doble para manejar una producción de 900 [bpd] de líquido y 5 [mmpcd] de gas, a una presión de 1000 [lb/pg²] (figura 4.8).



Figura 4.8 Lazo de separación-medición en plataforma para producción de gas húmedo (Kouba, et al., 2006).

4.2.2 Eliminador de gas

Igualmente por la compañía CNOOC se instaló en una plataforma en China un separador GLCC para la remoción parcial de gas en una plataforma de producción. Una fracción del gas separado es enviada al quemador y el resto es enviado a un barco de producción y procesamiento (FPSO). Las características del separador GLCC son de entrada doble, de 42 [pg] de diámetro y 23 [pies] de alto. Las condiciones promedio de operación fueron 345 [lb/pg²] de presión, 46750 [bpd] de gasto de aceite y 9000 [mmpcd] de gasto de gas, ver figura 4.9.



Figura 4.9 Eliminador de gas en plataforma (Kouba et al., 2006).

4.2.3 Eliminador de líquido de la corriente de gas húmedo

Algunas aplicaciones del eliminador de líquido de la corriente de gas húmedo han sido para desarrollar el conocido bombeo neumático (BN) autoabastecido, en el que se separa el gas de la producción de pozos con altas presiones y se crea una red local de distribución de gas para inyectarlo en pozos de baja presión. El separador GLCC es una excelente alternativa para estos sistemas ya que son de bajo costo, compacto, eficiente y requiere mínimo mantenimiento en comparación de los convencionales.

Estas aplicaciones surgieron de la necesidad de ayudar con BN a pozos que ya no podían producir naturalmente, en plataformas sin el sistema de BN o infraestructura de generación de energía, pero que contaban con pozos cercanos de alta presión. En la figura 4.10 se muestra un separador GLCC para eliminación de líquido con dimensiones de 12 [pg] de diámetro y 12 [pies] de alto y condiciones de producción de 4000 [mpcd] de gas y 500 [bpd] de líquido a 1700 [lb/pg² man]. La primera aplicación para BN de gas crudo fue instalada en Nigeria en la que se demostró su éxito para condiciones de altas presiones.



Figura 4.10 Separador GLCC para eliminación de líquido de campos de gas húmedo (Kouba et al., 2006).

4.2.4. Sistema de manejo de baches

El separador GLCC proporciona adecuadas separaciones gas-líquido, sin embargo, debido a su tamaño compacto y por ende al corto tiempo de residencia del líquido, no es capaz de mantener un nivel de líquido adecuado bajo condiciones de flujo intermitente. En consecuencia, el gasto a la salida del líquido puede variar de igual forma que los gastos que llegan a la entrada del cuerpo del separador GLCC, lo que puede sobrepasar las capacidades de los equipos corriente abajo.

Debido a lo anterior, se desarrolló un sistema de manejo de baches, usando el separador GLCC con un diseño de entrada tal que permite la acumulación y estratificación del líquido y por lo tanto, reducir las fluctuaciones de flujo. En la figura 4.11 se muestran dos separadores GLCC como sistema de manejo de baches implementados en Duri, Indonesia. El separador GLCC para manejo de baches ha sido motivo de más investigación y desarrollo en el programa TUSTP, sin embargo, no se pretende profundizar en esta aplicación.



Figura 4.11 Separadores GLCC para manejo de baches en Duri, Indonesia (Kouba et al., 2006).

4.3. En México

Se tiene información de dos aplicaciones en México del separador GLCC y una evaluación como alternativa, las cuales han sido posibles debido a que PEMEX es parte del grupo de las compañías patrocinadoras del programa TUSTP, por lo cual tiene acceso al software de diseño y a la patente para poder desarrollar y usar el separador compacto GLCC. La descripción de estas aplicaciones se presenta a continuación:

4.3.1. Alternativa del manejo de la producción en superficie

En la publicación de Flores M. et al. (2007) se presenta una alternativa al manejo de la producción en el actual Activo Integral Aceite Terciario del Golfo (AIATG) con el objetivo de apoyar a los campos maduros de este activo a prolongar su producción en condiciones estables, seguras y rentables.

La problemática que se presentó en estos campos fue que la producción resultaba complicada por la orografía de la región presentando problemas en los pozos como alta contrapresión en la línea de descarga, disminución de la producción, condiciones de flujo intermitente, uso de energía excesiva en los sistemas artificiales de producción empleados y por condiciones propias del activo, una rápida declinación de los yacimientos.

Un ejemplo del plan inicial del manejo de la producción contempla macroperas, que contienen hasta 19 pozos, de las cuales por cada siete se instalaría una batería de separación y por cada siete baterías de separación se construiría una estación de compresión, sin embargo debido a las problemáticas ya mencionadas estas instalaciones quedaban sobradas en menos de seis meses.

La alternativa-propuesta consistió en contar con paquetes “modulares” por cada macropera que incluyen separadores GLCC (figura 4.12) o en algunos casos separadores horizontales trifásicos, medición de fases, bombeo convencional o multifásico y compresión.

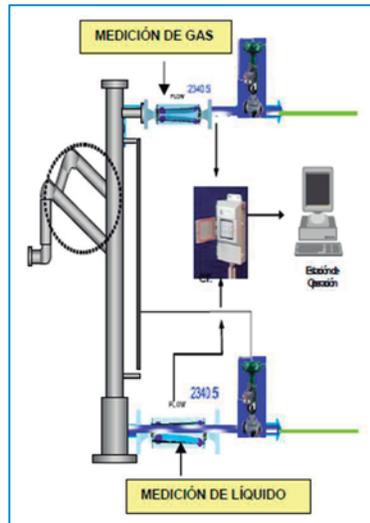


Figura 4.12 Separador GLCC como alternativa para el manejo de la producción en superficie (Flores M. et al., 2007).

Esta alternativa en comparación con el manejo de producción inicial se observa en la tabla 4.5:

Manejo Tradicional	Alternativa-propuesta
Batería de separación (4-6 Ha)	Paquete/Macropera (0.16 Ha, por 7 macroperas 1.12 Ha)
Red de B.N. (varios Km)	Red de B.N. local (150 m)
Alta contrapresión de pozos	Mínima contrapresión (2 Kg/cm ²)
Altos costos de inversión	Bajos costos de inversión
Instalaciones sobradas en poco tiempo	Se adapta de acuerdo a la producción

Tabla 4.5 Alternativa del manejo de la producción en superficie en el AIATG (Flores M. et al., 2007).

Los beneficios de esta alternativa son reducir costos al eliminar las baterías de separación y estaciones de compresión, creación de una red de B.N. local (lo que elimina el riesgo del transporte de gas a alta presión cerca de comunidades) y reducción de espacio para instalaciones de manejo de producción.

De una evolución técnica de tres macroperas, la reducción de la contrapresión, entre la macropera y la batería de separación, era del orden de 6 a 12 [kg/cm²] lo que incrementaba la producción de 10-30%, que en términos de producción van de 170-650 [bpd] y 0.4-5 [mmpcd] por macropera.

Además se pueden obtener los siguientes beneficios:

- Estabilidad en la operación de los pozos fluyentes.
- Manejo y transporte de la producción en forma segregada.
- En pozos que operan con bombeo neumático (BN) es posible disminuir el volumen de gas inyectado.
- En pozos que operen con bombeo mecánico (BM), es posible reducir la potencia del motor de superficie.

Finalmente, de esta alternativa se hace la recomendación del uso del separador GLCC por los incrementos de producción obtenidos y la reducción de los costos de inversión, operación y mantenimiento.

4.3.2. Aforo de pozos en plataforma

En un informe de Villalba Borbolla (2007) se presenta la aplicación de un separador GLCC-Accuflow en una plataforma satélite del Activo Integral Abkatun-Pol-Chuc. La aplicación surgió de la necesidad de realizar aforos de ciertos pozos, en los que por las limitantes de la plataforma satélite (espacio y carga) no era posible el uso de separadores convencionales por lo que el separador compacto GLCC-Accuflow fue la alternativa de medición de los volúmenes de las fases.

El separador GLCC-Accuflow consiste en una entrada tangencial a un cilindro para generar el vórtice y la separación por fuerza centrífuga. A diferencia del separador GLCC simple esta entrada no es descendente, además de incluir secciones horizontales conectadas en las salidas de los fluidos para permitir un tiempo de residencia en el que termina de separar el líquido del gas. La configuración de este separador se observa en la figura 4.13, junto con la imagen del separador real:

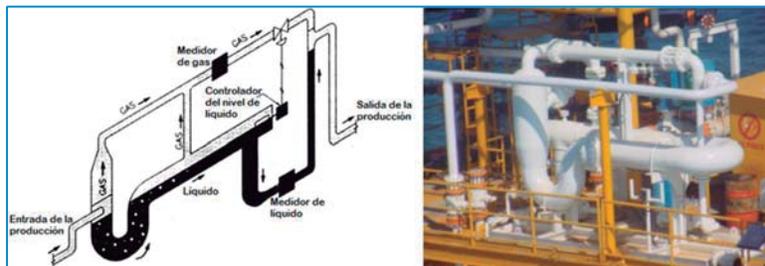


Figura 4.13 GLCC-Accuflow: Diseño general, lado izquierdo e imagen de aplicación real en una plataforma de PEMEX, lado derecho (Villalba Borbolla, 2007).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Los dos únicos aforos hasta el año 2004 (tiempo en que se realizó el aforo con el separador GLCC-Accuflow) con los que se contaban, eran los realizados con la terminación y se presentan en la tabla 4.6.

Año	Qo [bpd]	Qg [mmpcd]	RGA [m ³ /m ³]	Ptp [kg/cm ²]	T [°C]	°API
1994	12993	12.98	178	206	103	30
1996	13973	13.97	181	140	140	30

Tabla 4.6 Datos de aforos de pozos pertenecientes a una plataforma de PEMEX (Villalba Borbolla, 2007).

Las características del separador construido se presentan en la siguiente tabla 4.7:

Sección	Diámetro [pg]
Vertical	24
Horizontal	18
Salida del líquido	4
Salida del gas	6

Tabla 4.7 Características del separador GLCC-Accuflow de aplicación en una plataforma de PEMEX (Villalba B., 2007).

El peso total aproximado del separador fue de 11 000 [lb] (453 [kg]) con un rango de incertidumbre de medición de 0.3% para el líquido y 3% para el gas. Las condiciones de diseño (producción máxima) fueron 17 [mbpd] y 18.3 [mmpcd] a una presión de 28 [kg/cm²] (400 [lb/pg²]).

Además de las limitantes de espacio y carga de la plataforma, un beneficio obtenido con este sistema de separación es la reducción de costos debido a que el separador convencional requería una inversión de 817 000 USD y el separador GLCC-Accuflow una inversión de 150 000 USD, lo que resulta en una reducción de 667 000 USD, por lo que significa una mejor opción para el servicio requerido.

4.3.3. Aforo de pozos en tierra

Esta aplicación fue documentada por Godoy-Alcántar et al. (2008), presentando el desarrollo e implementación de un sistema multifásico de medición para un amplio rango de condiciones de operación en el Activo Integral Poza Rica-Altamira (AIPRA) de la región norte. Actualmente opera en el Activo Integral Aceite Terciario del Norte (AIATG). El separador GLCC de entrada doble se muestra en la figura 4.14.



Figura 4.14 Separador GLCC para aforo en tierra de aplicación en México (IMP).

Los parámetros más significativos de los pozos fueron los flujos volumétricos, presiones y viscosidades, por lo que el dimensionamiento se realizó para las condiciones máximas y mínimas de operación. El separador fue construido en acero al carbón cédula 40 y con características que se muestran en las tablas 4.8 y 4.9 siguientes:

Datos GLCC	Valor nominal
Diámetro	6 [pg]
Longitud	14.76 [pies]
Diámetro de la línea de entrada (dual)	4 [pg]
Diámetro de la línea de alto rango de flujo de gas	2 [pg]
Diámetro de la línea de bajo rango de flujo de gas	1 [pg]
Diámetro de la línea de flujo de líquido	2 [pg]

Tabla 4.8 Configuración del separador GLCC desarrollado por personal del IMP (Godoy-Alcántar et al., 2008)

Variable	Rango
Gasto de líquido	30-800 [bpd]
Gasto de Gas	0.02-1 [mmpcd]
Corte de Agua	0-95 [%]
Gravedad específica	0.75 [adimensional]
Temperatura	77-95 [°F]
Presión	6-21 [Kg/cm ²]

Tabla 4.9 Condiciones de diseño del separador GLCC desarrollado por personal del IMP (Godoy-Alcántara et al., 2008).

Debido a que el rango de medición de gas es muy amplio se decidió colocar dos salidas para este, una para alto flujo y otra para el caso contrario, equipadas con sus válvulas correspondientes. El sistema cuenta con un medidor de corte de agua para estimar el porcentaje de agua en la fase líquida.

El sistema de medición de flujo multifásico fue puesto en operación para evaluar el desempeño en pruebas de aforo de pozos. De los datos del aforo se obtuvo la producción de un pozo, con un promedio de 272 [bpd] de líquido de los cuales 73 [bpd] son de aceite y 200 [bpd] son de agua, y una producción de 23 [mpcd] de gas para el tiempo de duración del aforo. La prueba fue comparada con una medición en el tanque de medición de la batería con la cual tuvo una diferencia de 1.31% con respecto al medido.

De las pruebas se concluyó que el separador GLCC reduce significativamente las dimensiones, así como los costos por el incremento de eficiencia del proceso de separación, sin embargo, esta reducción de dimensiones requiere de un sistema de control por los efectos de las variaciones de flujo. Finalmente, los resultados experimentales obtenidos con el sistema de medición muestran la eficiencia y confiabilidad de éste para separar las fases y mediarlas de forma individual.

4.4. Submarinas

La producción de hidrocarburos en el lecho marino, especialmente en aguas profundas, tiene inherentemente el reto de la reducción de la contrapresión a boca de pozo, donde la presión hidrostática y las pérdidas de presión por fricción son de igual forma un desafío a vencer por los tirantes de agua y las distancias que tienen que recorrer los hidrocarburos hacia las instalaciones de procesamiento en superficie, ya sea en plataforma o en tierra (González Moreno, 2011).

La selección de equipo submarino se realiza con base en la eficiencia y confiabilidad de los equipos, así como por los beneficios de incremento de producción y ahorros en costos en las instalaciones superficiales. Por el lado de los equipos de separación submarina, éstos son diseñados para operar sobre el lecho marino y separar los fluidos no estabilizados provenientes de los pozos para ser transportados de acuerdo a su fase (gas y líquido principalmente y para separadores trifásicos gas, aceite y agua) hacia las instalaciones superficiales generalmente (González Moreno, 2011).

Las aplicaciones submarinas de la tecnología de separación compacta GLCC se han implementado en tres campos, la primera aplicación fue en un proyecto liderado por la compañía Petrobras con el objetivo de mantener una alimentación suficiente de líquido a un sistema de bombeo para su correcto funcionamiento y poder manejar las grandes fracciones presentes de gas (Kouba et al., 2006), sin embargo, no se podrá profundizar en esta primera aplicación submarina debido a una limitación de acceso a la información.

Las otras dos aplicaciones submarinas, que son similares entre sí y forman parte del sistema de separación y bombeo submarino en aguas profundas de los campos Perdido en el Golfo de México (tirante de agua 2400-3000 [m]) y Parque Das Conchas en mar Brasileño (tirante de agua 1600-2000 [m]) descritas a continuación:

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

El sistema de separación y bombeo submarino (SBS, Separation and Boosting System; figura 4.15) emplea la separación ciclónica como principio de separación de fases gas-líquido, usando un separador denominado Caisson, que está basado en la configuración del separador GLCC.

La aplicación de este sistema de separación y bombeo submarino muy probablemente es parte de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio al sistema de separación y bombeo realizadas en Winterthur, Suiza en el año 2007, debido a que el nivel de líquido de los separadores Caisson del campo Perdido son controlados con la velocidad de bombeo, lo cual fue una propuesta en las pruebas de laboratorio desarrolladas.

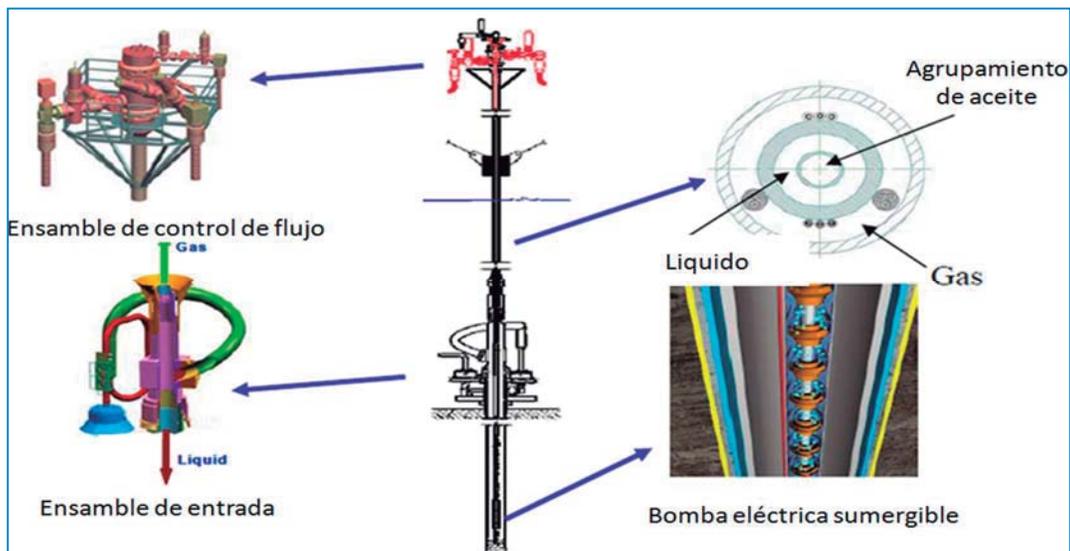


Figura 4.15 Sistema de Separación y Bombeo (SBS, Separation and Boosting System) del Campo Perdido (Purdy et al., 2010).

El funcionamiento del sistema de separación y bombeo de forma general opera de la siguiente manera: El flujo multifásico de los pozos productores entra al separador Caisson en la parte superior y fluye hacia el interior a través de una entrada descendente y tangencial. El líquido y el gas son separados conforme viajan en el cuerpo del separador, de forma descendente y en espiral. La separación es causada por la fuerza centrífuga que experimentan los líquidos hacia las paredes del separador. Los líquidos son enviados al fondo donde son bombeados ascendentemente por una bomba electrocentrífuga sumergible (BEC) en una línea de flujo hacia las instalaciones superficiales. El gas fluye por sí solo con la presión de operación (Purdy et al., 2010).

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

El diseño del sistema es capaz de adaptarse a las condiciones futuras de producción como el cambio de la RGA, propiedades de los fluidos y corte de agua, lo que es necesario para el equipo submarino, intervenir lo mínimo posible en operaciones de reparación y mantenimiento.

Una ventaja de conjugar el separador GLCC, como separador Caisson y la bomba ESP a través del sistema de separación y bombeo submarino es el requerir equipo menos complicado (bombeo multifásico), con menor mantenimiento y que se pueda manejar mayor producción. Otras ventajas de separar el líquido y el gas en el lecho marino son que se minimiza la formación de hidratos y los riesgos de bacheo en el riser, asociados con las condiciones de aguas profundas. Lo anterior se logra debido a que el separador Caisson tiene el objetivo de separar la mayor cantidad de gas libre posible, lo que mejora la eficiencia de la bomba, aunque ésta soporte cierta cantidad de gas.

La puesta en operación de estos separadores Caisson fue realizada en noviembre del 2009 para Parque Das Conchas y marzo del 2010 para el campo Perdido. Esquemáticamente se muestra en las figuras 4.16 a y b los separadores Caisson de los campos Perdido y Parques Das Conchas, respectivamente. Seguido de los esquemas de los separadores Caisson, se muestra en la figura 4.17 una imagen real del separador Caisson del campo Perdido.

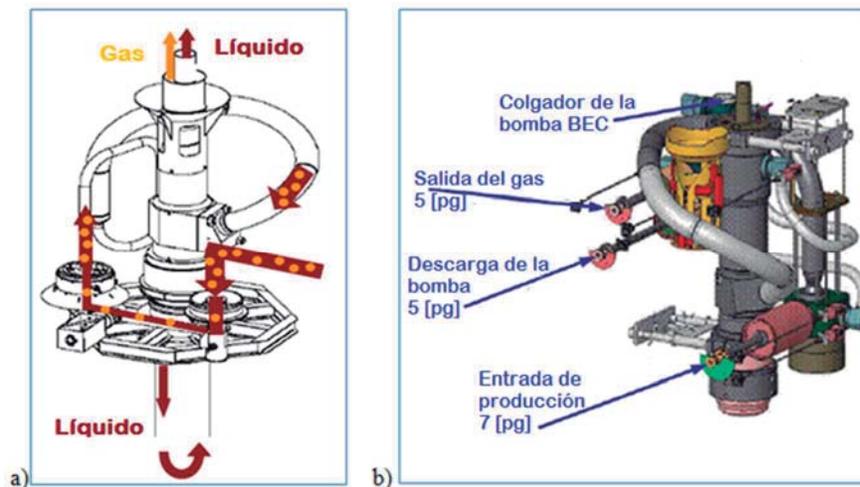


Figura 4.16 Separador Caisson (basado en la configuración del separador GLCC). a) Modelo del separador Caisson del Campo Perdido (Purdy et al., 2010). b) Modelo del separador Caisson del Campo Parque Das Conchas (Olijnik & La Caze).



Figura 4.17 Separador GLCC submarino del Campo Perdido (Van khoi, Fantoft, Shaw, & Gruehagen, 2009).

Las características de las condiciones de operación, así como la configuración de estos separadores se presentan en la siguiente tabla 4.10:

Proyecto /Campo	Localización	Tirante de agua [m]	°API	Fecha de operación	Qo total del sistema [mbpd] (Condiciones en las líneas)	Presión [lb/pg ² abs]	Diámetro [pg]	Longitud [m]	RGA [pie ³ /bl]
Perdido	Golfo de México (jurisdicción estadounidense)	2,382-2926	17-40	Marzo 2010	20-40	5000-8900	35	106	350-2600
BC-10	Brasil	1,600–2,000	17-44	Agosto 2009	28	---	31.5	100	200-3800

Tabla 4.10 Características del separador Caisson de los campos Perdido y Parque Das Conchas (González M., 2011 y McKee et al., 2012).

Finalmente la recomendación para el control del nivel de líquido en el separador Caisson para evitar el arrastre de fluidos se realiza mediante la velocidad de la bomba y un controlador de proceso PID (Proportional–Integral–Derivative controller).

CONCLUSIONES

Actualmente la tecnología de separación compacta GLCC es una alternativa para la separación de fases gas-líquido debido a sus ventajas respecto a los separadores convencionales. El éxito de esta tecnología se demuestra con más de 4000 aplicaciones, así como con los rangos de operación cubiertos que van de decenas a más de 150 [mbpd] de gasto de líquido, de 60-70,000 [mpcd] de gas y presiones de decenas a más de 10,000 [lb/pg² abs]. Lo anterior logrado con separadores de dimensiones que van de 1-60 [pg] de diámetro y de 6-20 [pies] de altura.

La aplicación más exitosa del separador GLCC ha sido como medidor multifásico, tanto en tierra como en costa afuera (plataformas).

La aplicación más innovadora del separador GLCC (con ciertos ajustes) es en el sistema de separación y bombeo submarino en aguas ultra-profundas, el cual por sus características de diseño simple (sin internos y partes móviles), eficiencia de separación, mínimo mantenimiento, bajo costo (respecto a un separador convencional) y dimensiones relativamente compactas, lo hacen una alternativa adecuada para estos sistemas.

En México la única aplicación conocida del separador GLCC ha sido como sistema de aforo de pozos, sin embargo, el potencial de aplicación de esta tecnología es muy grande debido a que PEMEX tiene facilidad de acceso al software y derecho al uso de la patente por lo que su alcance en un futuro podría llegar a ser la más innovadora hasta ahora, como la submarina.

Esta tecnología en general no está dirigida a ser un separador para estabilizar hidrocarburos, sino más bien hacia el diseño de un sistema de separación, buscando que sea el separador GLCC el que separe la mayor cantidad de gas y líquido de la corriente proveniente de los pozos, reduciendo problemas corriente abajo al transportar los fluidos en forma independiente.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

El proceso general de diseño es un procedimiento cíclico entre la evaluación de la configuración física (dimensiones) y el comportamiento de su operación, buscando evitar que se presenten los fenómenos del arrastre de líquido en la salida del gas y el arrastre de gas en la corriente de salida del líquido. La selección de la longitud y diámetro óptimo dependerá de las condiciones de operación en campo.

La base teórica de diseño del separador GLCC se desarrolla a través de modelos mecánicos que le permiten ser extrapolado a diferentes condiciones de operación, y dado el caso, ser modificado agregando un fenómeno físico más o considerando efectos que resultan despreciables en otros casos.

Los modelos mecánicos son los responsables de predecir los fenómenos físicos que forman los fluidos dentro del separador GLCC a través de métodos de cálculo y numéricos, haciendo necesario desarrollar programas de cómputo para facilitar la solución.

Una herramienta que ha ayudado a verificar y detallar los modelos mecánicos es la simulación computacional dinámica de fluidos (CFD, Computational Fluid Dynamics) debido a que aborda a detalle el comportamiento del flujo dentro del separador GLCC (conociendo previamente la configuración física), no obstante, esta simulación es laboriosa, por lo tanto, los modelos mecánicos son usados para determinar el dimensionamiento y comportamiento de operación.

La implementación de un sistema de control es indispensable para una separación eficiente cuando se presentan amplios rangos de producción o condiciones severas de operación, por lo que adicionalmente será necesaria una adecuada estrategia de control. El nivel de líquido y la presión son los parámetros principales a controlar, en un rango especificado, para la correcta operación del separador GLCC.

El principio de separación gas-líquido dominante es el inducir y someter a los fluidos a una fuerza centrífuga que apoyada por las fuerzas de flotación, centrípeta y gravitacional hacen posible una separación eficiente en la mayoría de los casos.

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

Las consideraciones de diseño para cualquier separador GLCC son: en la entrada inclinación de 27° respecto a la horizontal, flujo estratificado, entrada tangencial de los fluidos al cuerpo del separador, velocidad tangencial del líquido de 20 [pie/s] (6 m/s), diámetros que proporcionen velocidades de los fluidos menores que las críticas y/o de erosión, y un nivel de líquido adecuado por abajo de la entrada.

Las ventajas del separador GLCC respecto a los separadores convencionales son el tamaño compacto, peso reducido, bajos costos de mantenimiento e inversión, fácil de operar e instalar, no contiene internos ni partes móviles y es de una configuración simple.

Las desventajas que pueden presentarse son, que por sí solo, no es capaz de manejar condiciones severas de producción, el tiempo de residencia de los fluidos es reducido, el proceso de diseño sin una herramienta de cómputo puede llegar a ser extenso y laborioso, y el comportamiento de los fluidos dentro del separador es relativamente complejo.

RECOMENDACIONES

El conocimiento de este tipo de tecnologías relativamente nuevas, como el separador GLCC, así como de los modelos mecánicos y la simulación computacional dinámica de fluidos (CFD), deben ser dados a conocer más ampliamente en las materias correspondientes de la carrera, con el objetivo que los ingenieros petroleros puedan considerar y evaluar este tipo de tecnología en sus aplicaciones de campo, así mismo ampliar el conocimiento del comportamiento de los fluidos a través de los modelos mecánicos y la simulación CFD.

Se recomienda realizar diseños de separadores GLCC mediante la programación de los modelos mecánicos, las correlaciones de propiedades de los fluidos (para el caso que no se conozcan), y los procesos para obtener la configuración física, la operación y evaluación.

El uso de los diagramas de flujo del proceso general de diseño, dimensionamiento y comportamiento de operación, busca ayudar a entender más fácilmente el proceso de diseño del separador GLCC, dejando en una fase posterior la programación de éstos.

Algunos temas importantes que no se desarrollaron, por el alcance de esta tesis, son el manejo de sólidos y espumas (elementos y fenómenos inherentes en la producción de los pozos), así como el separador cilíndrico ciclónico líquido-líquido (LLCC, Liquid-Liquid Cylindrical Cyclone), temas que se han abordado en el programa TUSTP, por lo tanto, se recomienda abordarlos de forma más detallada para revisar y conocer las limitaciones tecnológicas.

Debido a que esta tecnología de separación compacta GLCC ha sido implementada exitosamente en diversas ocasiones y hoy en día disponible con algunas compañías en su línea de productos, su evaluación como alternativa de separación gas-líquido debe orientarse a la factibilidad técnica y económica entre las opciones para la selección del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arpandi, I. A. (1995). A Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Gas-Líquid Cylindrical Cyclone. Tesis de Maestria, Universidad de Tulsa.
2. Arpandi, I., Joshi, A., Shoham, O., Shirazi, S., & Kouba, G. (1996). Hydrodynamics of two-phase Flow in GLCC Separator. (SPE 30683), 427-436.
3. Baker, A., Nielsen, K., & Babb, A. (1988). Pressure Loss, Liquid Holdup Calculations Developed. Oil & Gas J., 55-59.
4. Chirinos, W., Gómez, L., Wang, S., Moham, R., Shoham, O., & Kouba, G. (2000). Liquid Carry-Over in Gas/Liquid Cylindrical Cyclone Compact Separators. SPE Journal, 5(3), 259-267.
5. Creus Sole, A. (2006). Instrumentación Industrial (Septima ed.). México: Alfaomega.
6. Erdal, F., & Shirazi, S. (2002). Effect of Inlet Configuration on Flow Behavior in a Cylindrical Cyclone Separator. ASME Presentada en la Engineering Technology Conference on Energy , MANU 29110, 1-9.
7. Erdal, F., Mantilla, I., Shirazi, S., & Shoham, O. (1998). Simulation of Free Interface Shape and Complex Two-Phase Flow. ASME presentado en Fluids Engineering Division Summer Meeting.
8. Erdal, F., Shirazi, S., Shoham, O., & Kouba, G. (1997). CFD Simulation of Singles-Phase and Two-Phase Flow in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. SPE(36645).
9. Flores Mondragón, S., López Ramírez, S., & Bernal Huicochea, C. (2007). Propuesta Innovadora del Manejo de la Producción de Hidrocarburos en Superficie en Campos del Proyecto Aceite Terciario del Golfo (Chicontepec). Segundo Congreso y Exposición Internacional del Petróleo en México, (págs. 1-9). Veracruz, México.

10. Garaicochea Petrirena, F., Bernal Huicochea, C., & López Ortiz, O. (1991). Transporte de Hidrocarburos por Ductos. México: Colegio de Ingenieros Petroleros de México.
11. Godoy-Alcántar, J. M., Cervantes-Martínez, G., Cruz-Maya, J. A., Hernández-Buenfil, M. Á., & Ramírez-Antonio, I. (2008). Sistema de Medición de Flujo Multifásico mediante Tecnología Ciclónica GLCC para Aforo de Pozos Petroleros. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, IX(4), 293-311.
12. Gómez, L. (1998). A State-of-the-Art Simulator and Field Application Design of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. Tesis de Maestría, Universidad de Tulsa, Oklahoma.
13. Gómez, L., Moham, R., Shoham, O., & Kouba, G. (1998). Enhanced Mechanistic Model and Field Application Design of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *SPE(49174)*, 533-544.
14. Gómez, L., Moham, R., Shoham, O., Marrelli, J., & Kouba, G. (1999). Aspect Ratio Modeling and Design Procedure for GLCC Compact Separators. (ASME, Ed.) *Journal of Energy Resources Technology*, 121, 15-23.
15. González Moreno, A. B. (2011). Separación Submarina, Manejo de Fluidos (aceite, gas, agua y arena) e Inyección a Pozos. Reporte Interno Técnico, IMP, Sistemas Submarinos de Producción, México, D.F.
16. Haheim, S., & Gaillard, X. (2009). A Simplified Subsea Separation and Pumping System. *SPE(124560)*, 1-9.
17. Joshi, A. R. (1995). Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. Experiments and Modeling. Tesis de Maestría, Universidad de Tulsa, Oklahoma.
18. Kouba, G., & Shoham, O. (1996). A Review of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC) Technology. *Production Separation Systems, International Conference*, (págs. 1-25). Aberdeen, Reino Unido.

19. Kouba, G., Shoham, O., & Shirazi, S. (1995). Design and Performance of Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separators. BHR Group 7th International Conference on “Multiphase 95”, 307-329.
20. Kouba, G., Wang, S., Gomez, L., Mohan, R., & Shoham, O. (2006). Review of the State-of-the-Art Gas/Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC) Technology- Field Applications. (SPE 104256), 1-8.
21. Liang-Biao, O., & Aziz, K. (1996). Development of New Wall Friction Factor and Interfacial Friction Factor Correlation for Gas-Liquid Stratified Flow in Wells and Pipelines. SPE(35679).
22. Mantilla, I., Shirazi, S., & Shoham, O. (1999). Flow Field Prediction and Bubble Trajectory Model in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC) Separators. ASME Energy Sources Technology Conference & Exhibition, 1-8.
23. Marti, S., Erdal, F., Shoham, O., Shirazi, S., & Kouba, G. (1996). Analysis in Gas Carry-Under in Gas-Liquid Cylindrical Cyclones. Presentada en “Hydrocyclones 1996” International Meeting.
24. McCain, W. (1990). The Properties of Petroleum Fluids (Segunda ed.). USA: PennWell.
25. McKee, M., Ionescu, S., Turner, T., Voight, R., Palombo, T., Albaugh, E. K., y otros. (2012). Status of the Technology: 2012 Worldwide Survey of Subsea Pumping Systems. Offshore Magazine(96).
26. McKee, M., Janardhanan, K., Moffitt, C., Ionescu, S., Burton, J., & Albaugh, E. (2011). 2011 Worldwide Survey of Subsea Processing: Separation, Compression, and Pumping System. Offshore Magazine y INTECSEA(91).
27. Michaelides, E. (2006). Particles, Bubbles & Drops: Their motion, heat and mass transfer. Word Scientific.

28. Moham, R., Wang, S., Shoham, O., & Kouba, G. (1998). Design and Performance of Passive Control System for Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *Journal of Energy Resources Technology*, 120, 49-55.
29. Morales Cruz, M. R., & Ríos Aguilar, H. F. (2010). Separadores Cilíndricos Ciclónicos Gas-Líquido (GLCC). Tesis de Licenciatura, UNAM, F.I., México D.F.
30. Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos* (Sexta ed.). México: Pearson Education.
31. Movafaghian, S. (1997). Effects of Geometry, Fluid Properties and Pressure on the Flow Hydrodynamics in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. Tesis de Maestría, Universidad de Tulsa, Oklahoma.
32. Nicolas Lopez, R. (2005). Simulador de Separador de Vórtice para Disociar tres Fases. Tesis Doctoral, UNAM, D.F.
33. Olijnik, L., & La Caze, D. (s.f.). Parque Das Conchas (BC-10) Subsea-Hardware System: Selection, Challenges and Lessons Learned. OTC(20649).
34. Purdy, G., Litelli, H., Lajeunesse, S., Coulon, T., Durham, K., & Lee, A. (2010). Perdido Regional Host Surveillance & Operation Technology. OTC(20889).
35. Redonda Godoy, C. A. (2008). Separación y Estabilización de Aceite Crudo. Tesis de Licenciatura, UNAM, México D.F.
36. Rojas Pérez, D. A. (2005). Simulación Dinámica de un Simulador Ciclónico Cilíndrico Gas-Líquido. Tesis de Maestría, UNAM, México, D.F.
37. Serway, R., & Jewett, J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (Septima ed., Vol. I). México: Cengage Learning.
38. Shoham, O. (2006). Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes. (SPE, Ed.) USA.
39. Shoham, O., & Kouba, G. (1998). State of the Art of Gas/Liquid Cylindrical-Cyclone Compact-Separator Technology. *JPT(SPE 39600)*, 58-65.

40. Swaraoop Kolla, S. (2007). Liquid Carry-Over in Gas-Liquid Cylindrical Cyclone (GLCC) Compact Separator for three-phase flow. Tesis de Maestria, Universidad de Tulsa.
41. Taitel, & Dukler. (1975). A Model for Predicting Flow Regime Transition in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE J.*, 22(1), 47-55.
42. Van khoi, V., Fantoft, R., Shaw, C., & Gruehagen, H. (2009). Comparison of subsea Separation Systems. *Offshore Technology Conference(20080)*, 1-12.
43. Vernon Smith, H. (1992). Oil and Gas Separators. En H. Bradly (Ed.), *Petroleum Engineering Handbook* (Tercera ed., págs. 12.1-12.41). Texas, U.S.A.: Society of Petroleum Engineers.
44. Villalba Borbolla, S. (2007). Aplicación del Separador Compacto GLCC-Accuflow en la Plataforma Satelite Taratunich-Tc. Reporte Interno, PEMEX.
45. Wang, S. (1997). Control System Analysis of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. Tesis de Maestría, Universidad de Tulsa, Oklahoma.
46. Wang, S., Gomez, L., Moham, R., Shoham, O., Kouba, G., & Marrelli, J. (2010). The State-of-the-Art of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Control Technology: From Laboratory to Field. *Journal of Energy Resources Technology*, 132(032701), 1-9.
47. Wang, S., Moham, R., Shoham, O., & Kouba, G. (1998). Dynamics Simulation and Control System Design for Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *SPE(49175)*, 545-560.
48. Wang, S., Moham, R., Shoham, O., & Kouba, G. (1998). Performance Improvement of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators Using Passive Control System. *ETCE(98-4651)*.
49. Wang, S., Moham, R., Shoham, O., Marrelli, J., & Kouba, G. (2000). Control System Simulations for Gas Liquid Clindrical Cyclone Separators. *Journal of Energy Resources Technology*, 122, 185-192.

50. Wang, S., Moham, R., Shoham, O., Marrelli, J., & Kouba, G. (2000). Performance Improvement of Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separators Using Integrated Liquid Level and Pressure Control Systems. *Journal of Energy Resources Technology*, 122, 185-192.
51. Wang, S., Moham, R., Shoham, O., Marrelli, J., & Kouba, G. (2002). Optimal Control Strategy of Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separators. *SPE Journal*(78270), 170-182.

APÉNDICES

A. NOMENCLATURA

Factor	Nombre	Unidades
<i>A</i>	Área	pie ²
<i>C_d</i>	Coeficiente de arrastre	adimensional
<i>C_o(C_f)</i>	Coeficiente de flujo	adimensional
<i>D/d</i>	Diámetro, dirección(distancia)	pie
<i>F_p</i>	Factor de corrección de la presión	adimensional
<i>f</i>	Factor de Fricción	adimensional
<i>g</i>	Aceleración gravitacional	pie/s ²
<i>H</i>	Colgamiento	adimensional
<i>h</i>	Altura	pie
<i>K</i>	Coeficiente de resistencia (conexiones o desviaciones)	adimensional
<i>L</i>	Longitud	pie
<i>P</i>	Presión	lb/pg ²
<i>q</i>	Gasto volumétrico	pie ³ /s, bpd
<i>R</i>	Radio	pulgadas [pg]
<i>RGA</i>	Relación gas-líquido	[pie ³ /bl], [m ³ /m ³]
<i>r</i>	Coordenada en radianes	pulgada [pg]
<i>Re</i>	Número de Reynolds	adimensional
<i>S</i>	Perímetro (mojado)	pie
<i>T</i>	Temperatura	°F
<i>t</i>	Tiempo	s
<i>V</i>	Volumen	pie ³
<i>v</i>	Velocidad	pie/s
<i>W</i>	Ancho	pie
<i>We</i>	Número de Weber (We=7)	adimensional
<i>z</i>	Coordenada axial	pie
<i>Z</i>	Distancia axial	pie
<i>z_t</i>	Distancia axial de la interface gas-líquido	pie

Letras Griegas

Factor	Nombre	Unidades
α	Ángulo de inclinación de la entrada	°
β	Ángulo del vector de velocidad tangencial	°
Δ	Incremento/Caída	adimensional
δ	Espesor del filamento de gas	pie, pulgada
μ	Viscosidad	cp
τ	Esfuerzo de corte	lbf/pie ²
ρ	Densidad	lbm/pie ³
σ	Tensión Superficial	lbf/s ²
Φ	Pérdidas de presión por fricción	lb/pg ²
Ω	Intensidad de giro	adimensional
ω	Velocidad angular	1/s

Acrónimos

CFD	Computational Fluid Dynamic
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
GCV	Válvula de Control de Gas
GLCC	Separador Cilíndrico Ciclónico Gas-Líquido
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
LCV	Válvula de Control de Líquido
NL	Nivel de Líquido
PID	Proportional-Integral-Derivative controller
TUSTP	Tulsa University Separation Technology Project

Superíndices

Factor	Nombre
m	Exponente de la densidad de la mezcla (m=0.9)
n	Exponente de velocidad tangencial (n=0.9)
'	Condiciones antes del inicio de arrastre
-	promedio

Subíndices

Factor	Nombre
<i>a-m</i>	Flujo anular a niebla
<i>b</i>	Burbuja
<i>B</i>	Flotación en dirección radial
bo	Arrastre neto de líquido con el flujo de gas (blowout)
<i>c</i>	Núcleo, fase continua
crít	crítica
cN	Núcleo de gas (flujo anular)
<i>C</i>	Centrípeta en dirección radial
CF	Centrífuga en dirección radial
<i>D</i>	Arrastre en dirección radial
<i>d</i>	Gota, arrastre
<i>e</i>	Área efectiva de captura
<i>eqv</i>	Equivalente
<i>f</i>	Fluido, película de líquido (bolsa de gas, flujo bache)
<i>g</i>	Gas
gtb	Bolsa de gas (flujo bache)
<i>h</i>	Altura de la boquilla
<i>i</i>	Inicial, interfásial
in	Entrada
is	Boquilla (inlet slot)
<i>L / l</i>	Líquido
<i>ls</i>	En el cuerpo del bache
<i>lw</i>	Líquido hasta la corona del vórtice
<i>m</i>	Mezcla
<i>p</i>	Fase dispersa
<i>r</i>	Radial
<i>s</i>	Separador, superficial, cuerpo del bache
<i>t</i>	Tangencial
<i>tis</i>	Tangencial en la boquilla
<i>u</i>	Unidad del bache

Situación Actual de la Tecnología de Separación Compacta GLCC

V	Vórtice
vc	Corona del vórtice
w	Pared
z	Dirección axial, corona del vórtice
0	Flujo sin arrastre de líquido en la salida del gas
1	En la entrada
2	En la salida
100	Burbuja mínima (diámetro) que se incorpora al filamento de gas
θ	Angular

B. FORMULARIO DE LOS MODELOS MECANÍSTICOS

BASE DE LOS MODELOS MECANÍSTICOS

Nivel de Líquido (NL)

$$NL = L_{l1} = \frac{\phi_L - \phi_g + \rho_L g L_{l3} - \rho_g g (L_{in} + L_{g1} - L_{g2})}{g(\rho_L - \rho_g) - \left(\frac{f_{L1} \rho_L v_{L1}^2}{2D_1} \right)} \quad (2.5)$$

$$\phi_L = \frac{\rho_L}{2} \left(\sum_{i=2}^n \frac{f_i L_i v_i^2}{D_i} + \sum_{i=1}^n K_i v_i^2 \right)_L \quad (2.3)$$

$$\phi_g = \frac{\rho_g}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{f_i L_i v_i^2}{D_i} + \sum_{i=1}^n K_i v_i^2 \right)_g \quad (2.4)$$

Interfase Gas-Líquido

$$z(r) = \frac{\Delta P(r)}{g(\rho_L - \rho_g)} \quad (2.10)$$

$$\Delta P(r) = \int_r^{R_s} \frac{\rho_m(r) [v_t(r)]^2}{r} dr \quad (2.9)$$

$$v_t(r) = v_{tis} \left(\frac{r}{R_s} \right)^{0.9} \quad (2.6)$$

v_{tis} Con teoría de Taitel & Dukler (1975)

$$\rho_m(r) = \rho_g + (\rho_L - \rho_g) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{0.9} \quad (2.8)$$

Colgamiento sin flujo neto de líquido (H_{L0})

$$H_{L0} = \left[1 - \left(\frac{v_{sg}}{1.15 v_{sg} + 0.35 \sqrt{g D_s \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_L} \right)}} \right) \right] \left(1 - \frac{L_d}{L_{g1}} \right) \quad (2.15)$$

$$L_d = \frac{1}{\frac{2g}{v_{sg}^2} - \frac{C_d}{2} (\rho_g v_{sg})^2 - \frac{3}{32 \rho_L \sigma g}} \quad (2.16)$$

Trayectoria de la burbuja

$$Z_t = \int_{R_s}^r \frac{v_z}{v_r(r)} dr \quad (2.25)$$

$$v_r(r) = \sqrt{\frac{4[\rho_m(r) - \rho_g]v_t(r)^2 D_b}{3\rho_L r C_d(r)}} \quad (2.20)$$

$$\rho_m(r) = \rho_g + (\rho_L - \rho_g) \left(\frac{r}{R_s}\right)^{0.9} \quad (2.8)$$

$$v_t(r) = v_{tis} \left(\frac{r}{R_s}\right)^{0.9} \quad (2.6)$$

$$C_d(r) = \frac{24[1+0.173 Re(r)^{0.657}]}{Re(r)} + \frac{0.413}{1+16300 Re(r)^{-1.09}} \quad \text{para } Re < 400 \quad (2.21)$$

$$C_d(r) = -10^{-7} R_e(r)^2 + 10^{-3} R_e(r) + 0.1222 \quad \text{para } 400 \leq Re \leq 5000 \quad (2.22)$$

$$C_d(r) = 2.4 \quad \text{para } Re > 5000 \quad (2.23)$$

$$Re(r) = \frac{\rho_m(r)v_r(r)D_b}{\mu_L} \quad (2.24)$$

Eficiencia de separación de las burbujas

$$E(\%) = \frac{\pi r_e^2}{\pi R_s^2} = \left(\frac{r_e}{R_s}\right)^2 \quad (2.26)$$

Inicio de flujo niebla-anular (Velocidad crítica de gas)

$$v_{g \text{ crit}} = v_{a-n} = 0.6812 \left(7\sigma \frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g^2}\right)^{0.25} \quad (2.27)$$

AVANCES DE LOS MODELOS MECANÍSTICOS

Corrección del colgamiento sin flujo neto de líquido

$$H'_{L0} = \left[1 - \left(\frac{v_{sg}}{1.15v_{sg} + 0.35 \sqrt{gD_s \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_L} \right)}} \right) \right] \left(1 - \frac{L_d}{L_{g1}} \right) F_p \left(1 + \frac{\%Arrastre}{100} \right) \quad (2.30)$$

$$F_p = 1 \quad \text{Para } P \leq 146.5 \text{ [lb/pg}^2 \text{ man]} \quad (2.28)$$

$$F_p = 3.7176P^{-0.2633} \quad \text{Para } P > 146.5 \text{ [lb/pg}^2 \text{ man]} \quad (2.29)$$

$$\%Arrastre = \left(\frac{q_{l\text{arrastrado}}}{q_{l\text{entrada}}} \right) * 100 \quad (2.31)$$

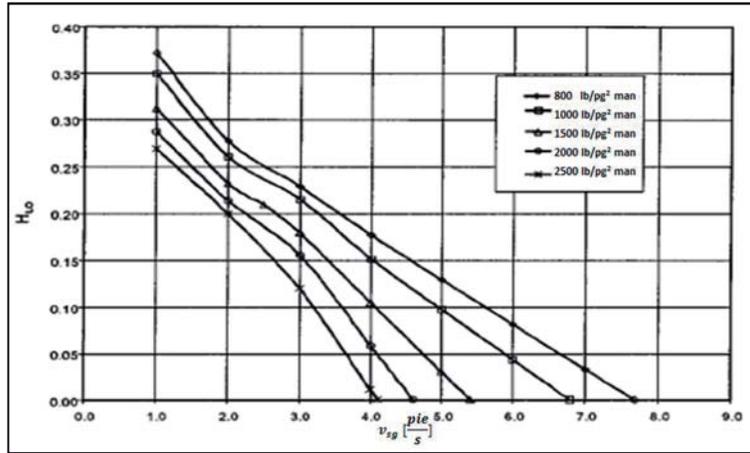


Figura 2.6 Predicción del colgamiento sin flujo neto de líquido para altas presiones (Chirinos et al., 2000).

Boquilla

$$A_{boquilla} = \frac{A_{in}(\%Reducción)}{100} = W_{eqv} L_h \quad \text{Para } L_h < d \quad (2.33)$$

Velocidades tangenciales de entrada para flujo estratificado

$$v_{tl} = \frac{q_l}{h_{l2} W_{eqv}} \cos \theta \quad (2.51)$$

$$v_{tg} = \frac{q_g}{A_{boquilla} - (h_{l2} W_{eqv})} \cos \theta \quad (2.52)$$

$$ah_{l2}^5 + bh_{l2}^4 + ch_{l2}^3 + dh_{l2}^2 - eh_{l2} + f = 0 \quad (2.44)$$

$$a = \frac{g}{\cos \theta} \quad (2.45)$$

$$b = \left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right) \frac{v_{g1}^2}{2} - \frac{v_{l1}^2}{2} - g \left(\sin \theta + \frac{h_{l1}}{\cos \theta}\right) - \frac{2gL_h}{\cos \theta} \quad (2.46)$$

$$c = v_{l1}^2 L_h + 2g \left(\sin \theta + \frac{h_{l1}}{\cos \theta}\right) L_h + \frac{gL_h^2}{\cos \theta} - \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) v_{g1}^2 L_h \quad (2.47)$$

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L}\right) \left[v_{g1}^2 L_h^2 - \frac{q_g^2}{W_{eqv}^2} \right] - \frac{v_{l1}^2 L_h^2}{2} - g \left(\sin \theta + \frac{h_{l1}}{\cos \theta}\right) L_h^2 + \frac{q_l^2}{2W_{eqv}^2} \quad (2.48)$$

$$e = \frac{q_l^2 L_h}{W_{eqv}^2} \quad (2.49)$$

$$f = \frac{q_l^2 L_h^2}{2W_{eqv}^2} \quad (2.50)$$

$$v_{l1} = \frac{q_l}{A_l} \quad (2.38)$$

$$v_{g1} = \frac{q_g}{A_g} \quad (2.39)$$

Velocidades tangenciales de entrada para flujo estratificado

$$v_{tg} = v_{tl} = v_{m2} = \frac{q_g + q_l}{A_{boquilla}} \cos \theta \quad (2.54)$$

$$v_{min} = \frac{q_l + q_g}{A_{in}} = (v_{sl} + v_{sg})_{in} \quad (2.53)$$

Velocidades tangenciales de entrada para flujo bache

$$v_m = v_{sl} + v_{sg} = v_{l\ ls} H_{L\ ls} + v_{g\ ls} (1 - H_{L\ ls}) \quad (2.57)$$

$$v_{g\ ls} = v_m + 1.54 \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_g)}{\rho_L^2} \right]^{0.25} H_{L\ ls}^{0.5} \quad (2.59)$$

$$H_{L\ ls} = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_m}{28.41}\right)^{1.39}} \quad (2.58)$$

$$v_{gtb} = 1.25v_m + \sqrt{gd_{in}} (0.54 \cos \theta + 0.35 \sin \theta) \quad (2.61)$$

$$\bar{v}_l \text{ corriente arriba} = v_{l \text{ ls}} \frac{L_s}{L_u} + v_f \left(1 - \frac{L_s}{L_u}\right) \quad (2.55)$$

$$\bar{v}_g \text{ corriente arriba} = v_{g \text{ ls}} \frac{L_s}{L_u} + v_{g \text{ tb}} \left(1 - \frac{L_s}{L_u}\right) \quad (2.56)$$

$$L_s = 15L_{in} \quad (2.60)$$

$$L_f = L_s \left[\frac{v_{l \text{ ls}} H_{L \text{ ls}} - v_{sl}}{(v_{sl} - v_{l \text{ ls}} H_{L \text{ ls}} - v_{tb})(1 - H_{L \text{ ls}})(v_{tb}(1 - H_{L \text{ tb}}))} \right] \quad (2.62)$$

$$L_u = L_f + L_s \quad (2.63)$$

Velocidades tangenciales de entrada para flujo anular

$$v_{tl} = \left[\frac{(\rho_L - \rho_c)g \sin \theta \delta^2}{3\mu_L} + \left(f_i \frac{\rho_c \bar{v}_{cN}^2}{4\mu_L} \right) \delta \right] \cos \theta \quad (2.68)$$

$$\frac{\pi d (\rho_L - \rho_c) g \sin \theta}{3\mu_L} \delta^3 + \pi d \left(f_i \frac{\rho_c \bar{v}_{cN}^2}{4\mu_L} \right) \delta^2 - (1 - F_E) q_l = 0 \quad (2.70)$$

$$\bar{v}_{cN} = \frac{v_c}{2} \left(1 + \frac{A_{in}}{A_{boquilla}} \right) \quad (2.69)$$

$$F_E = 1 - e^{-0.125(\varphi - 1.5)} \quad (2.65)$$

$$\varphi = 10^4 \frac{v_{sg} \mu_g}{\sigma} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5} \quad (2.66)$$

$$v_{tg} = v_c \frac{A_{in}}{A_{boquilla}} \cos \theta \quad (2.67)$$

$$v_c = v_{sc} = v_{sg} + v_{sl} F_E \quad (2.64)$$

Forma del Vórtice

$$L_v = \left[\frac{4\rho_g + (\rho_L - \rho_g)}{4(\rho_L - \rho_g)} \right] \left(\frac{v_{tl}^2}{2g} \right) \quad (2.74)$$

$$z = L_{l1} - \frac{\rho_v \omega^2 d_{sep}^2}{4g} \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{2r}{d_{sep}} \right)^2 \right] \quad (2.72)$$

$$\rho_v = \left[\frac{\rho_g}{2(\rho_L - \rho_g)} + \frac{1}{4} \left(\frac{2r}{d_s} \right)^2 \right] \quad (2.73)$$

$$\omega = \frac{v_{tl}}{R_s} \quad (2.71)$$

Trayectoria de la burbuja

$$\Delta z_p = \int \frac{v_{cz}(r) + v_{pz}(r)}{v_{pr}(r)} dr \quad (2.80)$$

$$v_{pz}(r) = \frac{(\rho_p - \rho_c) d_p^2}{18 \mu_c} \quad (2.77)$$

$$v_{pr}(r) = \frac{4}{3} \left(\frac{\rho_p - \rho_c}{\rho_c} \right) \left(\frac{v_{ct}(r)^2}{r} \right) \left(\frac{d_p}{Cd} \right) \left(\frac{1}{v_{pd}(r)} \right) \quad (2.75)$$

$$v_{pd}(r) = \sqrt{v_{pr}^2(r) + v_{pz}^2(r)} \quad (2.76)$$

Gotas $Cd = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687})$ (2.78)

Burbujas $Cd = \frac{16}{Re} \left\{ 1 + \left[\frac{8}{Re} + \frac{1}{2} (1 + 3.315 Re^{-0.5}) \right]^{-1} \right\}$ (2.79)

Deterioro de la velocidad tangencial

$$v_{ct}(r) = v_{tw}(z) \frac{r}{R_{sep}} \quad (2.84)$$

$$v_{tw}(r) = \frac{3}{2} \bar{v} \Omega \quad (2.82)$$

$$\bar{v} = \frac{4q}{\pi d_s^2} \quad (2.83)$$

$$\Omega = 1.48 \left(\frac{\dot{m}_t^2 A_s}{\dot{m}_s^2 A_{fase}} \right)^{0.93} \exp \left[-0.113 \left(\frac{\dot{m}_t^2 A_s}{\dot{m}_s^2 A_{fase}} \right)^{0.35} \left(\frac{z}{d_s} \right)^{0.7} \right] \quad (2.81)$$

C. GLOSARIO

Coefficiente de arrastre (Cd): Elemento que se presenta en la determinación de la fuerza de arrastre, el coeficiente es un número adimensional que depende de la forma del cuerpo y su orientación con respecto a la corriente del fluido, el número de Reynolds del flujo, la rugosidad de la superficie y la influencia de otros cuerpos o superficies de las cercanías. La forma más práctica de calcular el coeficiente de arrastre es mediante correlaciones empíricas que dependen del número de Reynolds y en el que la única consideración es que el diámetro sea el del cuerpo, en el caso de una esfera (Mott, 2006).

Coefficiente de resistencia (K): En accesorios como válvulas, medidores y conexiones el coeficiente de resistencia es un término adimensional y representa una constante de proporcionalidad entre la pérdida de energía y la carga de velocidad. La magnitud del coeficiente de resistencia depende de la geometría del dispositivo que ocasiona la pérdida (generalmente válvulas y conexiones), y a veces la velocidad de flujo. Por lo general, este coeficiente se encuentra en tablas u obtenidas de los fabricantes (Mott, 2006).

Controlador: Instrumento que compara el valor de una variable controlada con un valor deseado y ejerce automáticamente una acción de corrección de acuerdo con las desviación (Creus Sole, 2006).

Computational Fluid Dynamics (CFD): La simulación CFD es la solución mediante equipos de cómputo de las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos a través de métodos numéricos mediante códigos computacionales. Algunos software comercialmente disponibles son Fluent/FIDAP, CFX, CFD-ACE y CFD-2000 (Michaelides, 2006).

Ecuación de Bernoulli: Es una expresión simplificada del principio de conservación de energía (ver previamente en este glosario), que está expresada como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

La interpretación es que cada término es una forma de energía que posee el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve en un sistema (Mott, 2006).

Limitaciones:

1. Válida sólo para fluidos incompresibles.
2. No haya dispositivos que agreguen o retiren energía.
3. No exista transferencia de calor en el fluido.
4. No hay pérdidas de energía por fricción.

Ecuación de continuidad: La ecuación general de continuidad aplicable para gases y líquidos relaciona la densidad del fluido, el área del flujo y la velocidad de éste en dos secciones (1 y 2) del sistema donde exista flujo estable (flujo volumétrico constante en las dos secciones). La expresión es la siguiente:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

Considerar que para el flujo estable de un líquido, conforme aumenta el área donde fluye, la velocidad se reduce. Esto es independiente de la presión y la elevación (Mott, 2006). La expresión se reduce a:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Ecuación de estado: Expresión que relaciona la presión, volumen y temperatura de un fluido (McCain, 1990).

Ecuación general de energía: Esta ecuación, considerando la ecuación de Bernoulli, es una extensión al incorporar la pérdida (por la fricción), remoción (como un motor de fluido) y adición de energía (como una bomba) h_L , h_R y h_A , respectivamente. La ecuación general de energía por lo tanto queda como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Esta ecuación elimina las limitantes 2 y 4 de la ecuación de Bernoulli (Mott, 2006).

Esfuerzo cortante: Concepto relacionado con el flujo y viscosidad de un fluido el cual está definido como la fuerza que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra, cuya magnitud depende de la magnitud de la viscosidad (Mott, 2006).

Factor de fricción: Es un componente adimensional importante en el cálculo de la pérdida de energía por fricción. Para el caso del flujo en tuberías éste se relaciona con el número de Reynolds y la rugosidad de la tubería (Mott, 2006). La forma más común de determinarla es con el diagrama de Moody o con las ecuaciones correspondientes dependiendo del tipo de flujo que se presente (laminar o turbulento).

Fuerza de arrastre: Fuerza que se presenta cuando un cuerpo (en esta tesis podría ser una burbuja o una gota) en movimiento está sumergido en un fluido y se define como una fuerza de resistencia en dirección contraria al movimiento de un cuerpo. La expresión que la define es:

$$F_d = C_D A \left(\frac{\rho v^2}{2} \right)$$

Donde:

C_D es el coeficiente de arrastre

A es el área del cuerpo

ρ es la densidad del fluido

v es la velocidad del fluido

Fuerza centrífuga: Fuerza ficticia (no existe interacción real entre dos objetos) que jala hacia afuera sobre un objeto móvil en una trayectoria circular (Serway & Jewett, 2008).

Fuerza centrípeta: Fuerza que jala hacia adentro en un movimiento circular por un cambio de dirección del vector velocidad (Serway & Jewett, 2008). La expresión que representa esta fuerza es:

$$F_c = m \frac{v^2}{r}$$

Donde:

F_c = Fuerza centrípeta

m= masa

v= velocidad

r= radio

Fuerza de flotación: Es una fuerza que actúa en dirección vertical y hacia arriba sobre un objeto que flota o que está sumergido por completo en un fluido (caso de una burbuja en esta tesis) y su magnitud es igual al peso del fluido desplazado (Mott, 2006). Su expresión matemática es:

$$F_b = \gamma_f V_d$$

Donde:

F_b = Fuerza de flotación

γ_f = Peso específico del fluido

V_d = Volumen desplazado del fluido

Medidor Coriolis: Los medidores tipo Coriolis son dispositivos que determinan el gasto másico del fluido a través de las deformaciones elásticas que sufre un tubo sensor que se mantiene vibrando en su frecuencia natural. La energía necesaria para mantener esta vibración, es proporcionada por el campo magnético de una pequeña bobina (Godoy-Alcántar et al., 2008).

Modelos empíricos (Correlaciones): En la predicción del flujo de dos fases, los modelos empíricos se basan en correlaciones de datos experimentales, por lo que están limitados generalmente a esas condiciones (Shoham, 2006).

Modelos mecanísticos: En la predicción del flujo de dos fases los modelos mecanísticos lo realizan considerando los principios y variables de los fenómenos físicos que ocurren en el flujo por lo que pueden ser extrapolados a diferentes condiciones con una confiabilidad significativa (Shoham, 2006).

PID: Tipo de controlador que reúne las ventajas de los controladores, proporcional, integral y derivativo, para obtener la corrección deseada de forma eficiente (con estabilidad y rapidez) de la variable controlada (Creus Sole, 2006).

Principio de conservación de energía: De física aprendimos que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Enunciado de la ley de conservación de la energía. En problemas de flujo de fluidos existen tres formas de energía: potencial (debido a la elevación), cinética (debido a la velocidad) y de flujo o llamada de presión (trabajo necesario para mover el fluido a través de cierta sección contra la presión).

Ahora considere un fluido en dos secciones (1 y 2), donde la presión (p), elevación (z) y velocidad (v) son diferentes entre estas secciones (Mott, 2006). Si no hay energía que se gane o se pierda en el fluido entre las dos secciones, entonces el principio de conservación de energía requiere que:

$$E_1 = E_2$$

Por lo tanto, expresando los tres tipos de energía en cada sección queda como:

$$\frac{wp_1}{\gamma} + wz_1 + \frac{wv_1^2}{2g} = \frac{wp_2}{\gamma} + wz_2 + \frac{wv_2^2}{2g}$$

Donde w es el peso del fluido, γ es el peso específico del mismo y g es la constante de gravedad.

Sistema de Control: Es una integración de componentes dispuestos en una secuencia tal que produzca una señal deseada para el control de ciertas variables (Rojas Pérez, 2005). El control se forma mediante un proceso, un transmisor, un controlador y elementos de control como válvulas (Creus Sole, 2006).

Transductor: Recibe una señal de entrada, que corresponde a una variable física como presión y temperatura, y la convierte generalmente en una señal de salida (Creus Sole, 2006).

Transmisores: Son aquellos instrumentos que captan la variable de proceso, a través de un elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática (3-15 lb/pg²), electrónica (4-20 mA) o digital (pulsos en forma de bits), principalmente. Dentro de los transmisores los hay ciegos (sin indicador local) y con indicador local incorporado (Maraña 2005).