

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN A ESCALA BANCO DE UN PROTOTIPO DE SEPARADOR CIMCI DE FLUJO ASCENDENTE CON AIRE Y AGUA.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Martínez Y., Marínés
Para optar al Título
de Ingeniera Química

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN A ESCALA BANCO DE UN PROTOTIPO DE SEPARADOR CIMCI DE FLUJO ASCENDENTE CON AIRE Y AGUA.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Jaime Hernández.

TUTOR INDUSTRIAL: MSc. Jorge Trujillo

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Br. Martínez Y., Marinés.

Para optar al Título
de Ingeniera Química

Caracas, 2010

Caracas, Noviembre 2010.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Marinés Martínez Y., titulado:

“EVALUACIÓN A ESCALA BANCO DE UN PROTOTIPO DE SEPARADOR CIMCI DE FLUJO ASCENDENTE CON AIRE Y AGUA”.

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. José Sorrentino

Jurado



Prof. Andrés Rosales.

Jurado



Prof. Jaime Hernández

Tutor Académico

DEDICATORIA

A DIOS por regalarme la oportunidad de vivir, a mi Familia por ser mi Fuerza y a ti por ser mi mejor complemento.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, “La Casa que Vence las Sombras” por regalarme una visión de vida diferente, por hacerme sentir parte de todo, por ser mi segundo hogar durante estos años.

Al Profesor Jaime Hernández, por ser en tan poco tiempo mi amigo, por darme su confianza, brindarme su ayuda y su tiempo, por regalarme siempre con paciencia su mejor actitud y por demostrarme que la excelencia no depende del tiempo si no de las fuerzas y el empeño que se utilicen para lograr las metas.

Al Señor Jorge Trujillo por haber atendido mis inquietudes en el desarrollo de este trabajo y por impartirme un poco de su conocimiento.

A DIOS como ser principal, por ser la energía que me dio vida y me permitió cumplir esta meta como tantas otras, por ser mi fortaleza y mi mejor Compañía.

A mi Mamá, La Luz de mi Vida, mi Mejor Motivo, el ser que me acompaña en cada paso, quien vive intensamente mis Alegrías, a quien Amo, ese ser que inexplicablemente siente en su corazón cada una de mis tristezas, quien me conoce más que nadie, quien seca mis lágrimas, quien se empeña siempre en hacerme Feliz. A ti mami por Amarme Siempre, Lo Logramos.

A mi complemento, mi ilusión, al ser que me ha hecho ser mejor, con el que me siento protegida y cada momento más Feliz, al hombre que Amo, a ti Jean por estar a mi lado y regalarme tu compañía para hacer que mi vida tuviese aun más sentido, por apoyarme cuando ya no tenía fuerzas, por pensar muchas veces más en mi que en ti, Te Amo.

A mi hermano, mi otra mitad, mi mejor amigo, quien me enseñó a leer, a ese ser que desde pequeños me guía, quien me impulsa a tomar decisiones y a luchar por ellas, de quien conservo siempre los mejores recuerdos, somos uno Hermano, Gracias por estar en mi vida.

A mi Papá, a mi héroe de siempre, a ese ser tan parecido a mí, Gracias por darme el ejemplo de perseverancia y de que si lo deseas y pones tu mayor esfuerzo si lo puedes lograr. A ti por ser ejemplo de trabajo digno, de constancia Te Amo Papá.

A mi Tía por ser mi segunda mamá, por estar siempre a mí lado y ser uno de mis mayores ejemplos, por cuidarme, por impulsarme a ser siempre mejor y alcanzar muchas metas profesionales.

A mis abuelos, por dar ejemplo de vida, por conservar el Amor más puro que jamás haya visto, por ser mi recuerdo más bonito, por su dedicación a la familia, por demostrar que el Amor verdadero aún existe, por cuidarme, por estar siempre allí, los Amo.

A mis más que Amigas, mis Hermanas, que saben todo el esfuerzo que puse y lo mucho que significa esta meta para mí, por permanecer a través del tiempo a mi lado apoyándome de cerca o de lejos, a Yanaina por ser mi mejor asistente y apoyarme siempre, a Andrea por todos tus consejos y a Eliana por tu amistad y comprensión.

A mis Amigos queridos, Luis, Victor, Alberto, Rosanna, Yimmi, David, Angélica, Maricarmen, Julia, Michelle, Vanessa, Eglenis por enseñarme que después de grandes también podemos hacer amigos y que hicieron mejor mi estadía en la universidad. Y a ti Manuel, por estar ante todo, por tu paciencia y tu amistad sincera. Al Profesor Humberto Kum, mi Buen Amigo, mi mejor guía durante toda mi carrera, por su excelencia como profesional y ser humano.

A la gente bonita de Intevep quienes me apoyaron y me enseñaron con paciencia y dedicación, a Leonardo Caliz por darme la oportunidad y confiar en mí, a Guillermo Lombano por toda su ayuda, William Blanco por su amistad, Jorge López por su apoyo y a Ramón Cabello por hacerme aprender.

A todos y cada uno Mil Gracias...

Martínez Y., Marinés.

**EVALUACIÓN A ESCALA BANCO DE UN PROTOTIPO DE
SEPARADOR CIMCI DE FLUJO ASCENDENTE CON AIRE Y
AGUA.**

**Tutor Académico: Prof. Jaime Hernández. Tutor Industrial: Msc. Jorge
Trujillo. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería
Química. Año 2010, 98 p.**

Palabras claves: Separador Ciclónico, Flujo Bifásico, Separador CIMCI, Multiciclón.

Resumen. Este Trabajo se realizó con la finalidad de evaluar el desempeño del prototipo de separador CIMCI (Ciclónico de Múltiples Cilindros Internos) de flujo ascendente con aire y agua como fluido de prueba, en el Circuito de Separación Gas-Líquido, ubicado en el laboratorio de Norte 6 de la empresa PDVSA Intevep; todo lo antes mencionado se plantea para diferentes caudales de gas entre 10 y 70 MPCSD y relaciones gas líquido entre 20 y 700 (PCSD/BPD). En base a los resultados obtenidos se determinó la ventana de operación del equipo, la cual estuvo limitada por la presencia de arrastre de líquido por la corriente de gas que sale del separador a partir de la operación del equipo con 50 MPCSD, condición límite de diseño del separador. Con respecto al arrastre de gas se obtuvieron valores por debajo del 5% para todos los puntos experimentales evaluados, lo que se considera aceptable en cuanto a la separación de gas. La caída de presión asociada en el separador CIMCI se mantuvo entre 1 y 5 psi para caudales de líquido menores a 700 BPD. Los caudales que brindan una eficiencia de separación adecuada bajo las condiciones de operación establecidas, son caudales de gas inferiores a 50 MPCSD y caudales de líquido inferiores a 700 BPD. Con respecto a los valores aproximados de Fuerza G, entre 7 y 130 G se alcanza una eficiencia de separación satisfactoria, sin la presencia de arrastre de líquido. Para un caudal menor de 50 MPCSD no se observa arrastre de líquido para valores de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área comprendidos entre 17 y 3000 Kg/m.s². Los patrones de flujo experimentales no coinciden totalmente con los obtenidos a través del mapa de patrón de flujo de Taitel y Dukler, debido a la configuración de tubería con la que se trabaje.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS..... XIII

ÍNDICE DE TABLAS.....XVI

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 2

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN 2

1.1. Planteamiento del Problema..... 2

1.2. Objetivos..... 3

 1.2.1 Objetivo General 3

 1.2.2 Objetivos Específicos 3

1.3. Antecedentes 4

CAPÍTULO II 6

MARCO TEÓRICO 6

2.1. Modelaje del flujo bifásico gas-líquido..... 6

 2.1.1. Fracción Volumétrica de líquido (Hold up HL)..... 7

 2.1.2. Fracción Volumétrica de Gas (Gas Void Fraction GVF)..... 7

 2.1.3. Densidad de la mezcla..... 10

 2.1.4. Velocidad superficial 10

 2.1.5. Velocidad superficial de la mezcla. 11

 2.1.6. Fuerza G 11

2.2. Patrones de flujo..... 12

 2.2.1. Flujo estratificado (stratified flow SF) 13

 2.2.2. Flujo intermitente (intermittent flow I) 13

2.2.3.	Flujo anular (annular flow A)	14
2.2.4.	Flujo de burbuja dispersa (dispersed bubble flow DB).....	14
2.2.5.	Flujo de Rocío (spray flow)	14
2.3.	Mapa de patrones de flujo	15
2.4.	Separadores.....	17
2.5.	Principios de Separación.....	18
2.5.1.	Cantidad de movimiento	18
2.5.2.	Asentamiento por gravedad.....	19
2.5.3.	Coalescencia.....	19
2.6.	Partes de un separador	19
2.6.1.	Sección primaria.....	20
2.6.2.	Sección secundaria o de asentamiento	20
2.6.3.	Sección de coalescencia	20
2.6.4.	Sección de recolección de líquido o sumidero.....	20
2.7.	Separadores Ciclónicos	21
2.7.1.	Clasificación de los separadores ciclónicos	21
2.7.2.	Componentes de un separador ciclónico.....	25
2.7.3.	Separador multiciclónico	27
2.7.4.	Mapa de operación de un separador ciclónico	27
2.7.5.	Ventajas y desventajas de los separadores ciclónicos.....	29
2.8.	Separador CIMCI	30
2.8.1.	Regiones del CIMCI	31
CAPÍTULO III.....		33

MARCO METODOLÓGICO	33
3.1. Revisión Bibliográfica	34
3.2. Reconocimiento del área de trabajo	34
3.2.1. Módulo de compresión.....	35
3.2.2. Módulo de bombeo	36
3.2.3. Módulo de separación	36
3.2.4. Módulo de adquisición de datos y control	37
3.3. Revisión de la matriz Experimental.....	39
3.4. Adecuación de la instalación	42
3.5. Ejecución del plan experimental	46
3.5.1. Identificación de las pruebas experimentales.....	46
3.5.2. Adquisición de los datos experimentales	47
3.5.3. Procedimiento de operación de las pruebas experimentales	48
3.6. Procesamiento de los datos experimentales	49
3.6.1. Determinación de la eficiencia de separación de líquido.....	49
3.6.2. Determinación de la eficiencia de separación de Gas.....	49
3.6.3. Determinación de los caudales reales de gas y líquido	50
3.6.4. Determinación de la caída de presión	50
3.6.5. Determinación de la fuerza centrífuga y flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.....	50
3.7. Análisis e interpretación de resultados.....	51
CAPÍTULO IV	52
ANÁLISIS DE RESULTADOS	52

4.1. Evaluación del prototipo de separador CIMCI de flujo ascendente.	53
4.1.1. Mapa de operación del prototipo de separación CIMCI de flujo ascendente.....	53
4.1.2. Determinación de la eficiencia de separación de líquido.....	54
4.1.2. Determinación de la eficiencia de separación de Gas.	57
4.1.3. Determinación de los caudales de gas y de líquido eficientes.	59
4.1.4. Determinación de la caída de presión dentro del separador CIMCI de flujo ascendente.	61
4.1.5. Determinación de la fuerza centrífuga y flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.	62
4.1.6. Patrones de flujo en la entrada del separador CIMCI.	65
CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES.....	74
Patrón de flujo en la entrada del separador.....	74
Rediseñar la matriz experimental.	74
Modificación del cálculo de flujo de la cantidad de movimiento por unidad de área.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXOS	80
Anexo 1: Diagrama de Tubería e instrumentación del Módulo de Compresión .	81
Anexo 2: Diagrama de Tubería e instrumentación del Módulo de Bombeo	82
Anexo 3: Diagrama de Tubería e instrumentación del Módulo de Separación. ..	83
Anexo 4: Procedimiento de arranque de planta en el circuito de separación gas liquido	84

Anexo 5: Procedimiento de operación del circuito de separación gas líquido	84
Anexo 6: Procedimiento de parada del circuito de separación gas líquido	85
Anexo 7: Fotos del separador CIMCI de flujo ascendente.	87
Anexo 8: Tablas de resultados.	89
Anexo 9: Cálculos Tipo.	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Diagrama esquemático del tubo lateral.	8
Figura N° 2: Patrones de flujo en tubería horizontal y ligeramente inclinadas.	15
Figura N° 3: Mapa de patrones de flujo para tuberías horizontales e inclinadas.	16
Figura N° 4: Mapa de patrones de flujo.	17
Figura N° 5: Disposición geométrica de los separadores ciclónicos.	23
Figura N° 6: Ciclones de flujo ascendente y descendente.	25
Figura N° 7: Componentes de un separador Ciclónico.	26
Figura N° 8: Geometría de un separador ciclónico.	26
Figura N° 9: Mapa de operación en la evaluación de separadores ciclónicos gas- líquido.	29
Figura N° 10: Regiones del separador CIMCI.	32
Figura N° 11: Esquema de la metodología utilizada.	33
Figura N° 12: Bosquejo del circuito de separación Gas Líquido.	35
Figura N° 13: Separador CIMCI de flujo ascendente y trampa de líquido.	37
Figura N° 14: Sistema de adquisición de datos y control del sistema de separación gas líquido.	39
Figura N° 15: Identificación utilizada en las pruebas experimentales.	47
Figura N° 16: Procedimiento de Operación durante las pruebas experimentales.	48
Figura N° 17: Mapa de operación del prototipo de separador CIMCI de flujo ascendente.	54
Figura N° 18: Identificación del arrastre de líquido en la trampa de líquido.	55
Figura N° 19: Eficiencia de separación de líquido en función del arrastre de líquido por la corriente de gas, en los distintos caudales de gas y de líquido alimentados.	56

Figura N° 20: Fracción de arrastre de gas en la corriente de líquido que sale por el fondo del separador.	58
Figura N° 21: Caudales de gas y líquido que generen la mayor eficiencia de separación.....	59
Figura N° 22: Caída de presión del separador CIMCI de flujo ascendente para toda la matriz experimental.....	61
Figura N° 23: Valores de fuerza G, que generan la mayor eficiencia de separación..	63
Figura N° 24: Flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada de separador para todos los puntos experimentales.	64
Figura N° 25: Mapa de patrón de flujo de los puntos experimentales según Taitel y Dukler.....	66
Figura N° 26: Patrones de flujo observados en la entrada del separador CIMCI.	67
Figura N° 27: Patrones de flujo reales de los puntos experimentales.	67
Figura N° 28: Comportamiento del separador CIMCI para una alimentación con patrón de flujo estratificado.	69
Figura N° 29: Región central del separador con una alimentación de patrón de flujo estratificado con presencia de tapón.	70
Figura N° 30: Comportamiento del separador con presencia de arrastre de líquido con flujo tapón.	71
Figura N° 31: Trampa de líquido en presencia de arrastre de líquido.	71
Figura N° 32: Separador CIMCI de flujo ascendente en el Circuito de separación de Norte 6.....	87
Figura N° 33: Región central del separador CIMCI de flujo ascendente.	87
Figura N° 34: Región de gotas del separador CIMCI de flujo ascendente.	88

Figura N° 35: Acercamiento de la entrada tangencial de la alimentación a los
ciclones..... 88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Condiciones de proceso para el diseño del separador de Norte 6.	40
Tabla N° 2: Matriz de pruebas experimentales preliminar.	41
Tabla N° 3: Matriz de pruebas experimentales.	41
Tabla N° 4: Instrumentación del circuito de separación gas líquido para el equipo CIMCI de flujo ascendente, variables lentas.....	43
Tabla N° 5: Instrumentación del circuito de separación gas líquido para el equipo CIMCI de flujo ascendente, variables rápidas.	45
Tabla N° 6: Caudales de gas y líquido que permiten obtener una eficiencia la mayor separación del prototipo de separación CIMCI de flujo ascendente.....	60
Tabla N° 7: Valores de las diferentes variables medidas relacionadas con el cálculo de Fuerza G.	89
Tabla N° 8: Valores y cálculos referidos al flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.	91
Tabla N° 9: Valores y cálculos referidos al flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.	92
Tabla N° 10: Cálculos referidos al arrastre de gas por la corriente de líquido.	93

LISTA DE SÍMBOLOS

A	:Flujo Anular
A_{Ent}	:El área de entrada.
A_T	:Área de la sección transversal de la tubería [m^2].
CIMCI	:Ciclónico de Múltiples Cilindros Internos.
DB	:Burbuja dispersa
EB	:Burbuja alongada
G	:Aceleración [$9,8 m/s^2$]
G	:Fuerza G [adimensional]
GVF	:Fracción Volumétrica de Gas [%].
H_L	:Hold up de líquido [adimensional].
I	:Flujo intermitente
k	:Función de las propiedades físicas a condición de operación del gas de presión (P) y temperatura (T).
L	:Longitud [m].
ml	:Masa del líquido [gr].
P_1	:Presión [Psia].
Qg	:Caudal volumétrico de gas [m^3/s].

Qg_1	:Caudal volumétrico de gas [PCSD].
Qg_2	:Caudal volumétrico de gas [PCSD].
Ql	:Caudal volumétrico de líquido [m^3/s].
r_{SEP}	:Radio del separador [m].
SL	:Flujo tapón
SS	:Estratificado liso
ST	:Estratificado
SW	:Estratificado ondulado
V	:Velocidad de la mezcla bifásica a la entrada del separador [m/s].
V_g	:Volumen de la sección de tubería ocupada por la fase gas [m^3].
V_l	:Volumen de la sección de tubería ocupada por la fase líquida [m^3].
V_{mr}	:Componente radial de la velocidad de la mezcla.
V_{sg}	:Velocidad superficial de gas [m/s].
V_{sl}	:Velocidad superficial de líquido [m/s].

Símbolos Griegos:

α	: Es un ángulo [radianes].
ρ_l	: Densidad del líquido que entra al separador [kg/m^3].
ρ_G	: Densidad del gas que entra al separador [kg/m^3].

- ΔP : Caída de presión [“H20]
 π : Numero adimensional [3.1416]
 ρ : Densidad de la mezcla bifásica gas líquido [Kg/m³].

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera de Venezuela se han establecido metas de producción, siendo estas fijadas por el Plan Siembra Petrolera comprendido en el período 2006-2012, en donde se plantea el aumento de la producción de gas de 6,3 a 11,5 MMMPCSD y de crudo de 3,3 a 5,8 MMBPD. Es por ello que se promueven proyectos e investigaciones que tengan como finalidad el aumento de la producción a nivel nacional.

Con el fin de aumentar la capacidad de las instalaciones de superficie y cumplir con los retos planteados por el Plan Siembra Petrolera 2006-2012 (Pérez, 2010), en el cual se promueve el incremento de producción de petróleo y gas así como la adecuación de los productos finales de acuerdo a exigencias internacionales, se hace necesaria la implementación de tecnologías de separación, que brinden una alta eficiencia, permitan manejar altas tasas de flujos y a su vez abarquen un espacio físico reducido. Es necesario mencionar que una tecnología que cumple de manera eficiente las características antes mencionada es la tecnología de separación ciclónica.

Por esta razón PDVSA Intevep, desarrolla dentro de sus instalaciones un equipo de separación Gas-Líquido a escala de banco que se fundamenta en un principio de separación ciclónica, orientado a crudos livianos y medianos, con la finalidad de ofrecer una alternativa de alta eficiencia a un costo razonable en los procesos de separación de fases en instalaciones de superficie. Debido a esto se hace necesario evaluar el desempeño del equipo de separación ciclónica de múltiples cilindros, denominado CIMCI (Brito y col., 2009). En el marco de esta investigación se utilizará un sistema de fluidos de procesos Aire-Agua, ya que este sistema permite la determinación de la eficiencia de separación y otros parámetros operativos necesarios para cumplir los objetivos de este Trabajo Especial de Grado.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la producción del petróleo son necesarias muchas etapas para manejar este recurso, etapas que engloban las actividades de transporte desde el yacimiento hasta la superficie donde será almacenado, separado, transformado y preparado para su utilización final. (Spurgeon y Flood, 2009)

Las corrientes de producción de hidrocarburos provenientes de los pozos son transportadas desde los cabezales de los pozos hacia las instalaciones de superficie. En este proceso el petróleo extraído trae asociadas diferentes fases y elementos que deben separarse con el fin de obtener el mayor valor posible de esas corrientes de producción y evitar daños en los equipos que las procesan, considerando que esas corrientes están compuestas típicamente por gas natural y petróleo crudo, entre otros. Es por esto que en las instalaciones de superficie el primer equipo en recibir esas corrientes de producción es el separador general de producción, el cual debe buscar la mayor eficiencia de separación, a fin de garantizar el correcto funcionamiento de los equipos que procesan las corrientes.

Con el fin de aumentar la capacidad de las instalaciones de superficie y cumplir con los retos planteados por el Plan Siembra Petrolera 2006-2012 (Pérez, 2010), en el cual se promueve el incremento de producción de petróleo y gas así como la adecuación de los productos finales de acuerdo a exigencias internacionales, se hace necesaria la implementación de tecnologías de separación, que brinden una alta eficiencia, permitan manejar altas tasas de flujos y a su vez abarquen un espacio físico reducido.

En la actualidad se hace necesaria la implantación y el manejo a escala industrial de la tecnología de separación ciclónica en las estaciones de flujo existentes, así como también en los nuevos y más actuales centros de operación, ya que esta implementación de tecnología llevará consigo además de las ventajas antes

mencionadas, la disminución de los paros en las instalaciones como consecuencia de los inconvenientes derivados de una separación ineficiente, reduciendo a su vez los costos y el tiempo requerido en intervención o mantenimiento a los equipos que se ven afectados por este tipo de problemas.

Por esta razón PDVSA Intevep, con el objeto de innovar tecnologías de separación Gas-Líquido ha venido desarrollando dentro de sus instalaciones un nuevo equipo de separación Gas-Líquido a escala de banco que se fundamenta en un principio de separación ciclónica, orientado a crudos livianos y medianos, con la finalidad de ofrecer una alternativa de alta eficiencia a un costo razonable en los procesos de separación de fases en instalaciones de superficie, por lo que se hace necesario evaluar el desempeño del equipo de separación ciclónica de múltiples cilindros, denominado CIMCI (Brito y col., 2009). En el marco de esta investigación se utilizará como sistema de fluido de procesos Aire-Agua, ya que este sistema permite la determinación de la eficiencia de separación y otros parámetros operativos necesarios para cumplir los objetivos de este Trabajo Especial de Grado. Lo cual lleva al planteamiento de los siguientes objetivos de trabajo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Determinar experimentalmente el intervalo de operación de un prototipo a escala banco de un separador tipo CIMCI de flujo ascendente que opera con flujo bifásico: Aire-Agua.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar cualitativamente la eficiencia de separación de líquido en función del arrastre de líquido en la corriente de gas.
2. Evaluar cuantitativamente la eficiencia de separación de gas en función de la fracción volumétrica de gas.

3. Seleccionar los caudales reales de flujo de gas y de líquido que permitan lograr una eficiencia de separación adecuada bajo las condiciones de operación establecidas.
4. Determinar la caída de presión, a través del separador CIMCI para toda la matriz experimental.
5. Establecer el rango adecuado de los parámetros de fuerza centrífuga y flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del CIMCI en función de la eficiencia de separación.

1.3. ANTECEDENTES

Es necesario establecer cuando se habla de separadores ciclónicos, que dicha tecnología fue implementada hace más de dos siglos, aunque su aplicación industrial no fue realmente firme hasta 1945, luego de la Segunda Guerra Mundial. Actualmente esta tecnología es implementada en numerosos procesos industriales de separación (Svarovsky, 1984).

Por las grandes utilidades y ventajas de este proceso de separación y con la visión fundamental de la implementación de equipos de separación compactos y eficientes, la empresa PDVSA-Intevep se ha encargado del estudio, diseño y desarrollo de diferentes prototipos de separación ciclónica Gas-Líquido desde el año 1999. Algunos de los trabajos de investigación que se pueden mencionar destacan los siguientes: “Estudio del comportamiento de separadores tipo ciclónico y dinámico con sistema agua-aire” (Hamana y col., 2000), “Estudio del comportamiento de separadores tipo ciclónico y dinámico con sistema aceite-aire” (Hamana y col., 2000), “Optimización geométrica de separadores gas-líquido tipo ciclón” (Méndez, 2002).

Los trabajos de investigación desarrollados dentro de la empresa PDVSA-Intevep que involucran al separador CIMCI comienzan con el realizado por Brito y col. (2007) “Diseño e Instalación de separadores ciclónico y multiciclónico para ser evaluados con mezclas aire-agua en el circuito de separación Norte 6”, en el cual se presenta la ingeniería de dos prototipos de separación ciclónicos instalados en el circuito de

Separación Gas-Líquido de PDVSA-Intevep ubicada en el Edificio Norte 6. En el trabajo de investigación realizado por Matson J. (2008) “Evaluación del desempeño de dos prototipos de separadores ciclónicos gas-líquido”, se estudia el comportamiento operacional de dos separadores ciclónicos que trabajan con una mezcla bifásica Agua-Aire, en dicho trabajo de investigación se determinó el mapa de operación de ambos separadores; CYCINT y multiciclón y se demostró que funcionan con eficiencias a 95% y 90% respectivamente.

Dichos estudios de investigación y diseño se implementaron y fueron la base de los siguientes trabajos de investigación experimental: trabajo de investigación realizado por Valdez y col. (2009), “Evaluación de los separadores ciclónicos CYCINT y ciclones múltiples con un sistema aceite/aire en el laboratorio de flujo multifásico Norte 6”, en el cual se estudia desde un punto de vista experimental, el comportamiento de dos tipos de separadores ciclónicos empleando una mezcla bifásica aceite-aire; dichos separadores poseen como principio de separación los efectos centrífugos. Y el trabajo de investigación realizado por Caliz y col. (2009), “Evaluación de los separadores ciclónicos CYCINT y ciclones múltiples con un sistema agua/aire en el laboratorio de flujo multifásico Norte 6”, en el cual se realiza un estudio experimental del comportamiento de dos tipos de separadores ciclónicos empleando una mezcla bifásica aire/agua. En los cuales se obtienen datos para el mejoramiento del diseño del separador que consiste en modificar geométricamente a la zona de salida superior de los ciclones, vortex finder y espacio anular de salida para evitar arrastre de líquido.

De los trabajos de investigación experimental referidos al separador CIMCI se obtienen diferentes recomendaciones que son la base para el trabajo de Brito y col., (2009) “Bases de Diseño de un Separador Ciclónico de Múltiples Cilindros de Flujo Ascendente”, en el cual se utiliza un algoritmo como herramienta para diseñar los prototipos del separador CIMCI a evaluar a escala de Banco, en donde se presentan las modificaciones de diseño que se consideran para una mayor eficiencia del separador CIMCI.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se reúne la información documental necesaria para confeccionar el diseño metodológico de la investigación, en donde se encontrarán definidos conceptos básicos y fundamentales que permitirán entender cómo y cuál información recolectar para sustentar los resultados obtenidos en el desempeño de este trabajo, proporcionando así un conocimiento profundo de la teoría que dará significado a la investigación.

2.1. MODELAJE DEL FLUJO BIFÁSICO GAS-LÍQUIDO.

El flujo bifásico es empleado para describir o señalar la presencia de dos fases en un mismo compuesto de trabajo. En la industria petrolera el flujo bifásico gas- líquido es ampliamente encontrado durante la producción y el transporte, ya que el flujo proveniente de los pozos está compuesto en su gran mayoría por petróleo al cual se encuentra asociada una porción de gas. El flujo proveniente del pozo es transportado tanto en tuberías horizontales, inclinadas o verticales. En la producción mar adentro, estas líneas de tuberías pueden tener longitudes considerables antes de llegar a las instalaciones de separación. Para su procesamiento y control se utilizan componentes de tuberías, separadores o slug catchers (Shoham, 2000).

Es importante destacar que existen razones fundamentales para separar el gas del petróleo, como lo son las razones operacionales para evitar problemas de bombeo o en equipos de trabajo, las técnicas que permiten estimar la producción total de cada fluido y finalmente las económicas, ya que el valor agregado final de cada fluido por separado se incrementa, obteniendo beneficios económicos evidentes. Es por ello que la industria se encarga de diseñar e innovar en equipos de separación que brinden una mayor eficiencia a la hora de obtener la separación de cada fase (Brito, 1999).

A continuación se presentan algunos conceptos básicos para el entendimiento del flujo bifásico gas-líquido.

2.1.1. Fracción Volumétrica de líquido (Hold up HL)

Representa la fracción o volumen elemental ocupado por la fase líquida en el flujo bifásico. El hold up de líquido es una fracción que varía desde cero para flujo monofásico de gas, a uno para flujo monofásico de líquido. (Shoham 2000).

$$H_L = \frac{V_l}{V_l + V_g} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

H_L : Hold up de líquido [adimensional].

V_l : Volumen de la sección de tubería ocupada por la fase líquida [m^3].

V_g : Volumen de la sección de tubería ocupada por la fase gas [m^3].

2.1.2. Fracción Volumétrica de Gas (Gas Void Fraction GVF)

El término fracción volumétrica de gas se utiliza para expresar la fracción del volumen ocupado por el gas en una mezcla de gas líquido a cualquier condición de presión y temperatura.

Según Chien y col. (1997) la determinación de la fracción de volumen ocupada por el gas, se realiza a través del método del tubo lateral. Esta técnica es práctica, económica y requiere una simple medición, además es de particular interés en la medición de la fracción de gas en muchos procesos de flujos bifásicos.

El método del tubo lateral se basa en la suposición de que las pérdidas de presión por fricción, al igual que las pérdidas de presión por aceleración son de menor importancia y se hacen insignificantes frente a la pérdida de presión gravitacional. Es por ello que la pérdida de presión total en todo el recorrido de prueba se supone que es la pérdida de presión gravitacional y está se mide mediante un transductor de presión diferencial. Quedando la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{Total} = \Delta P_{Gravitacional} \quad (\text{Ec. 2})$$

Haciendo referencia a la caída de presión que existe en el tubo principal con el que se trabaja, y sabiendo que este contiene tanto líquido como gas se deduce la siguiente ecuación:

$$\Delta P_1 = \rho_G \cdot g \cdot GVF_1 \cdot L_1 + \rho_l \cdot g \cdot (1 - GVF_1) \cdot L_1 \quad (\text{Ec. 3})$$

De donde se deduce la siguiente ecuación:

$$GVF_1 = \frac{\Delta P_1}{g \cdot L_1 \cdot (\rho_G - \rho_l)} - \frac{\rho_l}{(\rho_G - \rho_l)} \quad (\text{Ec. 4})$$

En la **Figura N° 1**, se evidencia el diagrama esquemático del tubo lateral en donde se mide la fracción de gas en el tubo lateral.

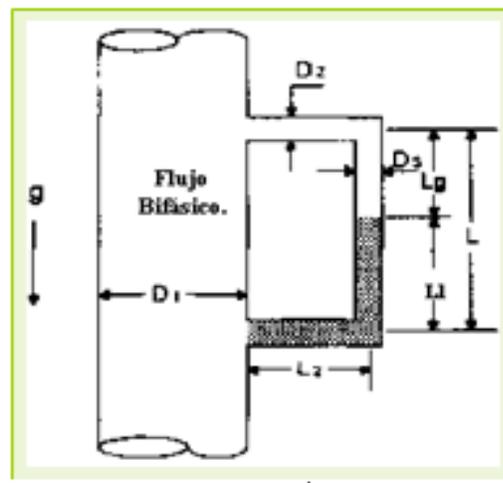


Figura N° 1: Diagrama esquemático del tubo lateral.

Adaptación Chien y col., (1997).

La altura o longitud puede ser medida directamente o asociada a la masa del cuerpo del líquido que es pesada durante la realización de las pruebas experimentales. Y es

necesario acotar que la relación de volumen de gas en el tubo lateral es la misma relación de gas presente en la tubería principal. De la siguiente manera se establece, despreciando la fricción y la aceleración:

$$GVF_2 = \frac{L_G}{(L_G + L_l)} = GVF_1 \quad (\text{Ec. 5})$$

De lo antes mencionado se puede concluir que la fracción de gas se puede obtener en base a la relación de altura del líquido y gas que se encuentre en la columna.

En este trabajo especial de grado, se pesara la masa de líquido recuperada con el cierre de las válvulas, posteriormente se calculara el volumen mediante el uso de la densidad, mediante la siguiente ecuación:

$$V_l = \frac{m_l}{(\rho_l)} \quad (\text{Ec. 6})$$

En función del volumen del cilindro del tubo lateral se calculara la altura puntual de líquido para cada medición de Hold up, mediante la siguiente ecuación:

$$L_l = \frac{V_l \cdot 4}{\pi \cdot D_3^2} \quad (\text{Ec. 7})$$

La altura de gas dentro del tubo lateral se calcula mediante la siguiente ecuación, sabiendo que la altura total del tubo lateral es de 0,398 m:

$$L_G = L - L_l \quad (\text{Ec. 8})$$

Posteriormente, se calculara el porcentaje de GVF, mediante la Ecuación 5, anteriormente mencionada.

2.1.3. Densidad de la mezcla

Según Shoham (2000) la densidad de la mezcla bifásica se define con la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_l \cdot H_L + \rho_G \cdot (1 - H_L) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

ρ = Densidad de la mezcla bifásica gas-líquido que entra al separador [kg/m³].

ρ_l = Densidad del líquido que entra al separador [kg/m³].

ρ_G = Densidad del gas que entra al separador [kg/m³].

2.1.4. Velocidad superficial

La velocidad superficial de una fase se define como la velocidad que adquiriría el flujo de una de las fases si se desplazara solo en el área transversal de la tubería por la que este circula. Las velocidades superficiales del líquido y el gas se muestran a continuación:

$$V_{sl} = \frac{Q_l}{A_T} \qquad V_{sG} = \frac{Q_g}{A_T} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

Qg: Caudal volumétrico de gas [m³/s].

Ql: Caudal volumétrico de líquido [m³/s].

V_{sg}: Velocidad superficial de gas [m/s].

V_{sl}: Velocidad superficial de líquido [m/s].

A_T: Área de la sección transversal de la tubería [m²].

2.1.5. Velocidad superficial de la mezcla.

Según Shoham y col. (2000) la velocidad superficial de la mezcla es la tasa de flujo volumétrico total de ambas fases por unidad de superficie, y está dada por:

$$V_m = \frac{Q_l + Q_g}{A_t} = V_{sl} + V_{sg} \quad (\text{Ec. 11})$$

2.1.6. Fuerza G

Para caracterizar la magnitud de la fuerza centrífuga se utiliza un parámetro adimensional (G) que se obtiene al dividir la aceleración centrífuga por la aceleración de la gravedad (Caliz y col., 2009). Barbuceanu y col., (2001) recomiendan que la fuerza centrífuga en el separador este en un intervalo entre 56 y 100 g, para asegurar una separación eficiente de las fases. La fuerza G, se encuentra definida por la siguiente ecuación:

$$G = \frac{V_{mr}^2}{g \cdot r_{SEP}} \quad (\text{Ec.12})$$

En el cual:

$$V_{mr} = \left(\frac{Q_l + k \cdot Q_g}{A_{Ent}} \right) \times \cos \alpha \quad (\text{Ec.13})$$

$$k = 0,02826 \cdot \left(\frac{zT}{P} \right)$$

Donde:

V_{mr} : componente radial de la velocidad de la mezcla

r_{SEP} : radio del separador [m].

k : función de las propiedades físicas a condición de operación del gas de presión (P) y temperatura (T).

α : es un ángulo de inclinación de la entrada con respecto a la horizontal [radianes].

A_{Ent} : el área de entrada [m²].

2.2. PATRONES DE FLUJO

El flujo simultáneo de gas y de líquido a través de un conducto, es una de las combinaciones de flujo bifásico más complejas que existen. Esto se debe principalmente a la gran variedad de configuraciones relacionadas con la distribución espacial de ambas fases en la tubería y, a que la fase gaseosa es compresible. Estas configuraciones espaciales se conocen como patrones de flujo (García, 2009).

La determinación de los patrones de flujo de sistemas es vital para la realización de cualquier proceso de separación, ya que de este dependen características puntuales de diseño de los separadores, tales como la caída de presión, entre otros (Brito, 1999).

Los patrones de flujo que se estudian, se presentan en flujos bifásicos al transitar por la tubería, son estudiados visualmente a través de tuberías transparentes que pueden ser horizontales, verticales y ligeramente inclinadas, determinando las diferentes interacciones entre el gas y el líquido, que dependen de las siguientes características o condiciones.

Los regímenes de flujo bifásico o patrones de flujo dependen de las siguientes condiciones (Shoham, 2000):

- Parámetros operacionales: Pérdidas por fricción entre los fluidos y la pared de la tubería, condición de flujo de líquido y gas, es decir, la variación entre sus caudales.
- Variables geométricas: Diámetro y ángulo de inclinación de la tubería.
- Propiedades Físicas: Tales como densidad, viscosidad y tensión superficial del gas y del líquido.

En el desarrollo de este trabajo experimental se evidenciará el estudio de patrones de flujo en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas.

Entre los patrones de flujo más conocidos para tuberías horizontales y ligeramente inclinadas según Shohan 2000, se encuentran:

2.2.1. Flujo estratificado (stratified flow SF)

Este patrón de flujo se produce a tasas de flujo del líquido y del gas relativamente bajos. Las dos fases se separan por gravedad, la fase líquida fluye en la parte inferior de la tubería, mientras que la fase gaseosa fluye en la parte superior (Shoham, 2000).

El patrón de flujo estratificado se subdivide en dos:

- **Estratificado liso (stratified smooth SS):** el cual se caracteriza por una separación completa de las fases, en el cual el líquido fluye por el fondo de la tubería y el gas por la parte superior de la misma (Beggs y Brill, 1998).

- **Estratificado ondulado (stratified wavy SW):** El cual se caracteriza por tener o presentar la velocidad del gas mayor con respecto a la que tenía el estratificado liso, produciéndose ondas en la interfaz gas líquido (Beggs y Brill, 1998).

2.2.2. Flujo intermitente (intermittent flow I)

El flujo intermitente se caracteriza por un flujo alterno de gas y líquido. A medida que ocurre el aumento del flujo de gas, las burbujas de gas tienden a disiparse y fluyen tapones de líquido y gas en forma alterna en la tubería. En este flujo el líquido puede ser aireado por burbujas pequeñas que se concentran hacia la parte delantera y en la parte superior de la tubería (Shoham, 2000).

Este tipo de flujo se divide en:

- **Flujo tapón (slug flow SL):** Se evidencia cuando se presentan grandes flujos o caudales de gas, que hacen un remolino en la parte delantera del tapón, el líquido que viene en este flujo contiene burbujas de gas.

- **Flujo de burbuja elongada (elongated bubble flow EB):** Es considerado el caso límite del flujo tapón, cuando el líquido de este flujo no contiene burbujas de aire (Shoham, 2000).

2.2.3. Flujo anular (annular flow A)

El flujo anular se produce a caudales muy elevados de gas. La fase gaseosa fluye en un núcleo interior de la tubería a alta velocidad y puede contener gotas de líquido retenido. El líquido fluye como una delgada película alrededor de la pared de la tubería. La película en la parte inferior es generalmente más gruesa que en la parte superior, dependiendo de la magnitud relativa de las tasas de flujo de gas y líquido. A menores tasas de flujo de gas, la mayor parte del líquido fluye en la parte inferior de la tubería, mientras que a mayores tasas de flujo de gas forma el líquido forma una delgada capa anular en la tubería (Shoham, 2000).

2.2.4. Flujo de burbuja dispersa (dispersed bubble flow DB)

El flujo de burbuja dispersa ocurre cuando existen velocidades superficiales elevadas de líquido, donde la fase líquida es continua y la fase gas es dispersa, de manera que el gas fluye a lo largo de la parte superior de la tubería en forma de burbujas que se dispersan uniformemente en el área transversal de la misma a medida que incrementa la cantidad de líquido en la mezcla (Brito, 1999).

2.2.5. Flujo de Rocío (spray flow)

El flujo de rocío se presenta cuando la cantidad de gas en la mezcla bifásica es mucho mayor a la de líquido, transformándose el flujo en una niebla, debido al desprendimiento completo del líquido de las paredes de la tubería y es arrastrado en forma de pequeñas gotas (Brito, 1999).

En la Figura N° 2, que a continuación se presenta se evidencia de una manera clara los patrones de flujo bifásico gas-líquido que se presentan en tuberías horizontales e inclinadas.

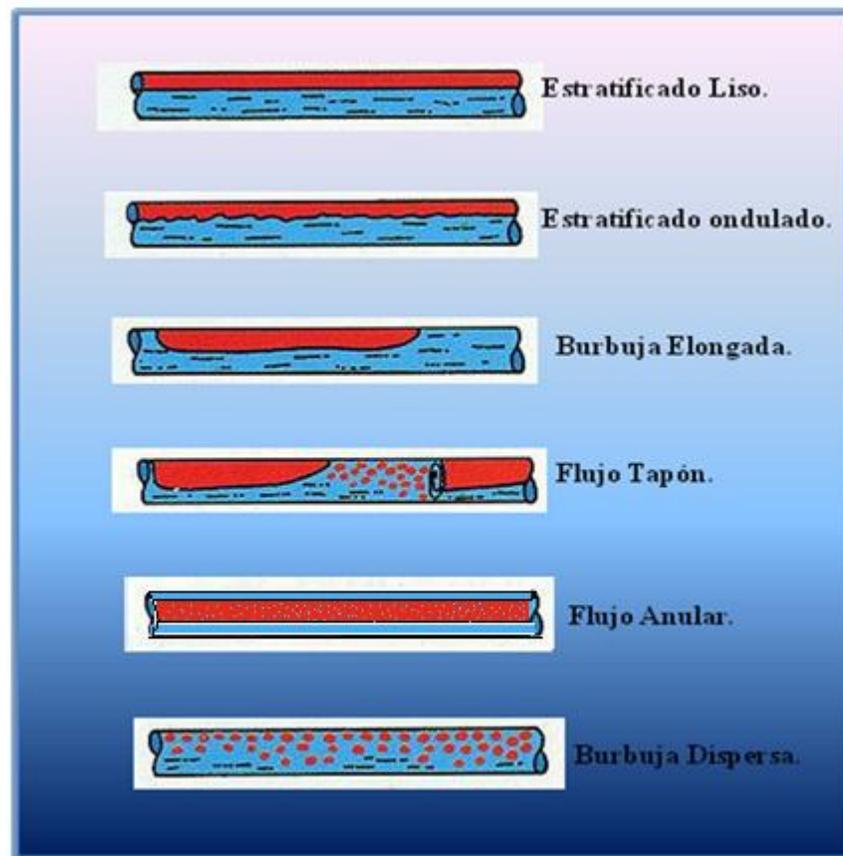


Figura N° 2: Patrones de flujo en tubería horizontal y ligeramente inclinadas.

Fuente: Adaptación Brown y Beggs. (2005)

2.3. MAPA DE PATRONES DE FLUJO

Un mapa de patrón de flujo es una representación en dos dimensiones en donde se limitan las transiciones de cada patrón de flujo anteriormente mencionados. Generalmente se utilizan como coordenadas la velocidad superficial del líquido y la velocidad superficial del gas, aunque no se descartan otras variables utilizadas como coordenadas.

En la mayoría de los casos las coordenadas son elegidas arbitrariamente, sin una base física. Así, cada plano es fiable sólo en el rango de condiciones similares a las de los que fueron adquiridos los datos iniciales, y la extensión para otras condiciones de flujo es incierta (Shoham, 2000).

La práctica común en la representación de patrones de flujo es la clasificación por medios visuales o de otro tipo, para graficar los datos como un mapa de flujo de dos dimensiones en función de los parámetros del sistema en particular. Empezando con los primeros mapas de patrón de flujo, tales como las propuestas por Bergelin y Gazley (1949) y Kosterin (1949), ha habido un debate en curso sobre la selección de pares de parámetros adecuados para representar los límites de transición patrón de flujo.

Un gran número de diferentes parámetros ha sido utilizado para presentar los datos experimentales en las coordenadas de dos dimensiones sobre la base de las velocidades superficiales. Un buen ejemplo son los mapas de flujo de Baker (1955) para el flujo horizontal y Hewitt y Roberts (1969) para flujo vertical para tuberías de pequeño diámetro. Dichos mapas de patrones de flujo establecidos se muestran en la **Figura N° 3**, que a continuación se presenta:

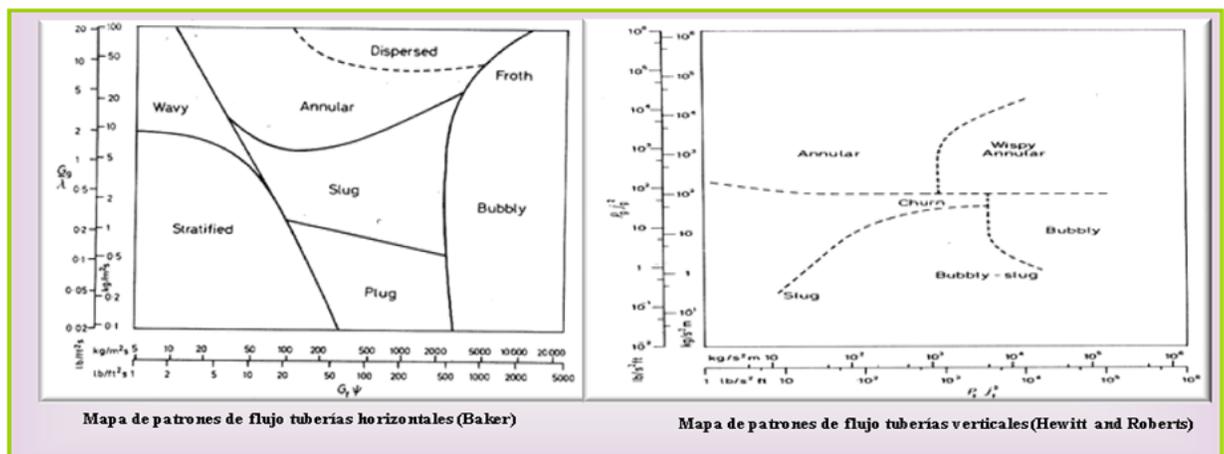


Figura N° 3: Mapa de patrones de flujo para tuberías horizontales e inclinadas.

Fuente: Corradini, 1997.

Refiriéndose a la descripción de los diferentes regímenes para el flujo simultáneo de gas y líquido en tuberías horizontales introducido por Y. Taitel y Dukler A. en 1976. Los resultados se muestran en dos dimensiones, mediante un mapa de patrón de flujo con la velocidad superficial del gas, V_{sg} , en el eje X y la velocidad del líquido superficial, V_{sl} , en el eje Y, ambas en m/s. El mapa Taitel-Dukler define la transición

entre el flujo de los diferentes regímenes más estrechamente que otros modelos y es ampliamente usado en la actualidad para establecer o simular el patrón de flujo de diferentes caudales operacionales.

En la **Figura N° 4**, se evidencia el mapa de patrón de flujo realizado por Taitel y Dukler, en donde se evidencia la transición de cada uno de los patrones de flujo anteriormente mencionados.

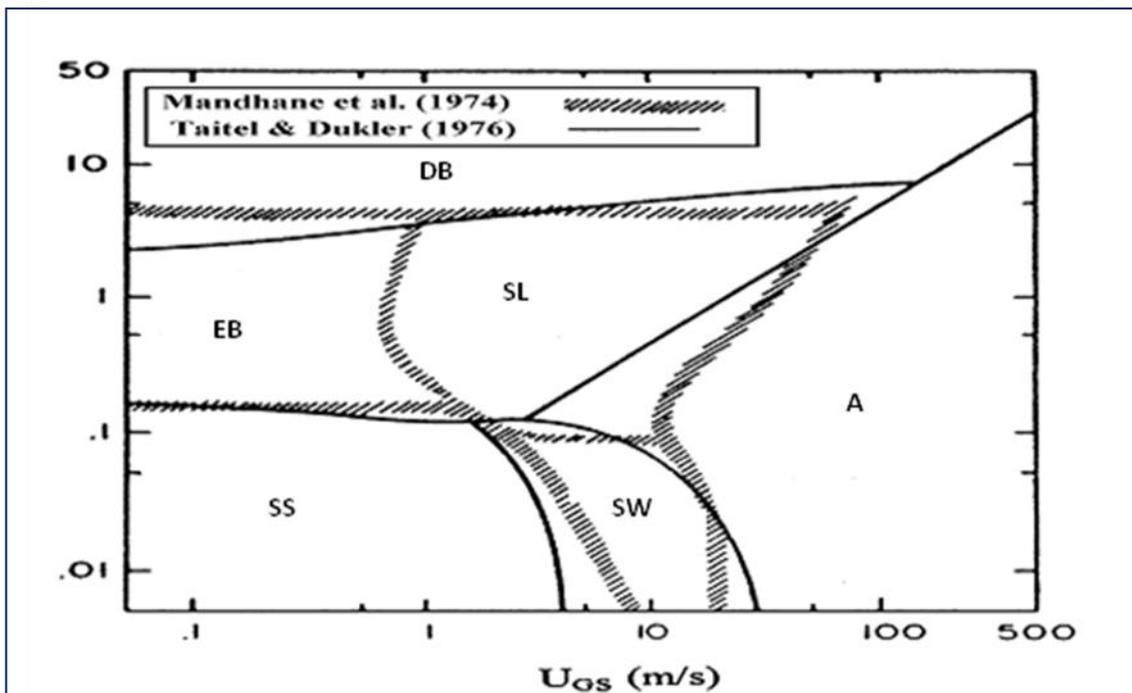


Figura N° 4: Mapa de patrones de flujo.

Fuente: Taitel y Dukler (1976).

2.4.SEPARADORES

Los separadores son recipientes a presión que se usan con el propósito de separar los fluidos de los pozos en sus componentes gas y líquidos (Brito, 1999).

Debido a que la separación física de las fases líquida y gaseosa es una de las operaciones básicas de la producción y procesamiento del petróleo y el gas, los separadores utilizados en este proceso, separan los componentes de ambas fases que

coexisten a una temperatura y presión específicas, para luego transformarlos en productos de mayor valor agregado. En cualquier instalación o proceso productivo el separador es siempre el primer equipo de procesos al que entran las corrientes de producción, para garantizar adecuadamente el desempeño de equipos aguas abajo.

En la industria petrolera los separadores utilizados, son construidos en configuraciones horizontales o verticales. Además, existen a su vez separadores de dos fases que separan gas de la corriente total de los líquidos y de tres fases si a su vez separan la corriente líquida en sus componentes de petróleo crudo y agua. En este trabajo especial de Grado se evaluará el desempeño de un separador de dos fases.

Los separadores son nombrados normalmente como depuradores de gas, cuando se encuentra una relación gas a líquido muy elevada.

2.5. PRINCIPIOS DE SEPARACIÓN

Según Omaña (2005), los principios fundamentales que deben tomarse en consideración en el momento de realizar la separación física de varias fases, son cantidad de movimiento, asentamiento por gravedad y coalescencia. Sin embargo, aunque toda separación puede emplear uno o más de estos principios, se debe tener en cuenta que ciertas condiciones para que dos fases sean separables, como que exista un diferencial entre las densidades de ambos fluidos y que las fases sean inmiscibles entre sí. Los principios de separación se describen a continuación.

2.5.1. Cantidad de movimiento

Se define como cantidad de movimiento lineal de una partícula al producto de su masa por su velocidad. Esta es una cantidad vectorial y tiene la misma dirección que la velocidad. Es un concepto que combina dos elementos que caracterizan el estado dinámico de una partícula (Omaña, 2005).

En otras palabras, puede entenderse el concepto de momentum, como la cantidad de movimiento que tiene un fluido de cierta densidad. Así, cuando una mezcla bifásica es sometida a un cambio violento en su dirección, ambos fluidos alcanzarán diferentes velocidades debido a que poseen distintas densidades (Omaña, 2005).

La ecuación con la que se define el flujo de cantidad de movimiento por unidad de área es la siguiente:

$$M = \rho \cdot V^2 \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

M= Flujo de cantidad de movimiento por unidad de área a la entrada del separador CIMCI de flujo ascendente [kg/m.s²].

ρ = Densidad de la mezcla bifásica gas-líquido que entra al separador [kg/m³].

V = Velocidad de la mezcla bifásica a la entrada del separador [m/s].

2.5.2. Asentamiento por gravedad

La separación por gravedad resulta, cuando la fuerza gravitacional que actúa sobre la partícula líquida, supera a la fuerza de arrastre que el vapor ejerce sobre la partícula a separar (Omaña, 2005).

2.5.3. Coalescencia

Este principio de separación es entendido como el fenómeno por medio del cual partículas líquidas de tamaño pequeño (que no se separan fácilmente por la acción de la gravedad), se unen entre sí para formar partículas de mayor tamaño, que sí pueden separarse posteriormente por asentamiento gravitatorio (Omaña, 2005).

2.6. PARTES DE UN SEPARADOR

Es necesario entender que aun cuando los separadores posean distintas configuraciones, están compuestos generalmente por una sección primaria o de entrada, una sección secundaria donde las fases fluyen libremente y una sección de recolección del líquido separado. Cabe acotar que puede existir una cuarta sección, si los separadores poseen una zona en el tope en donde se pueden colocar dispositivos internos de coalescencia, que permiten aumentar la eficiencia de separación (Omaña, 2005).

Las partes de un separador son definidas de la siguiente manera:

2.6.1. Sección primaria

Según Omaña (2005), esta sección es aquella parte del separador en la que ocurre la separación esencial de las fases líquida y gaseosa, debido al momentum. Esta sección puede contener una boquilla de entrada, que sea capaz de dirigir el flujo tangencialmente o un deflector de entrada para aprovechar a su vez los efectos inerciales de un cambio abrupto en la dirección para separar la mayor cantidad posible de líquido de la corriente de vapor.

2.6.2. Sección secundaria o de asentamiento

Esta sección es conocida como la parte libre del separador en la cual, teóricamente, el gas fluye a una velocidad relativamente baja y con poca turbulencia. En esta parte del separador las partículas líquidas que alcanzan cierto tamaño, son separadas del flujo de gas debido a la acción de la gravedad, mientras que las partículas más pequeñas del líquido flotarían en el gas.

Es utilizada únicamente la aceleración de gravedad en la separación de las fases de esta sección.

2.6.3. Sección de coalescencia

En esta sección se utilizan dispositivos de choque, en los cuales las partículas líquidas con un tamaño menor colisionan para unirse entre sí, formando a su vez, partículas de mayor tamaño que pueden ser separadas posteriormente por asentamiento gravitatorio.

En esta sección se eliminan las partículas de líquido más pequeñas que se hayan sido arrastradas por la corriente de gas.

2.6.4. Sección de recolección de líquido o sumidero

En esta sección del separador se recoge el líquido decantado proveniente de las secciones anteriormente nombradas. La fase líquida es recolectada en el fondo del recipiente, el cual deberá tener un volumen dado, dependiendo del proceso de

separación que se esté realizando, del tiempo necesario para desgasificar el líquido (Omaña, 2005).

2.7. SEPARADORES CICLÓNICOS

Los separadores centrífugos también conocidos como ciclónicos son dispositivos que utilizan la fuerza centrífuga para dar un movimiento rotatorio al fluido, que por diferencia de densidad se separa, siendo la fase menos densa la que queda en la zona central del separador, mientras que la zona más densa tiende a rotar en la pared interna del separador.

Los separadores ciclónicos son equipos ampliamente usados dentro de las operaciones de separación de partículas sólidas o líquidas de una corriente gaseosa, además de poder emplearse para separar sólidos o líquidos. Estos además poseen la ventaja de contar con gran sencillez estructural, no poseen partes móviles y exigen muy poco mantenimiento (Matson, 2008).

Típicamente, un gas con partículas que pueden ser sólidas o líquidas entra tangencialmente cerca de la tapa del ciclón a velocidades aproximadas de 30 m/s. El flujo del gas es forzado en una trayectoria espiral y sale limpio a través de una abertura central situada en la parte superior. El fluido más denso es forzado en una trayectoria en espiral a descender y salir a través de la parte inferior del separador. Los separadores ciclónicos pueden ser altamente eficientes en base al diseño y al tamaño de la partícula con la cual se trabaje, en avances recientes se emplean estos separadores en la separación de partículas de diámetro mayor a 5 μm (Cooper y col., 2010).

2.7.1. Clasificación de los separadores ciclónicos

Los ciclones convencionales se pueden encontrar en una gran variedad de tamaños y la entrada al equipo puede ser rectangular o circular. Una forma de clasificar los distintos tipos se puede efectuar atendiendo a la manera en que se produce la carga y la descarga del equipo y otro modo sería en función de su eficiencia. De acuerdo a su

disposición geométrica se distinguen los siguientes tipos de separadores ciclónicos (Fuente: Diquima, 2008):

El principio de funcionamiento en el cual se basan estos separadores ciclónicos es muy similar.

- a) De entrada tangencial y descarga axial: representan el ciclón tradicional y, aunque se pueden construir con diámetros más grandes lo más frecuente es que estos se encuentren entre los 600 y los 915 mm (Fuente: Diquima, 2008).
- b) De entrada tangencial y descarga periférica: en este tipo de ciclón el gas sufre un retroceso en el interior del equipo al igual que ocurre en un ciclón convencional. Sin embargo, presenta el inconveniente de que el polvo no es eliminado en su totalidad de la corriente gaseosa, aunque si se produce una concentración del mismo (Fuente: Diquima, 2008).
- c) De entrada y descarga axial: en este tipo de ciclones la diferencia fundamental se encuentra en que los diámetros son de menores dimensiones, entre 25 y 305 mm, con lo que gracias a esta característica su eficiencia es mayor aunque su capacidad es menor (Fuente: Diquima, 2008).
- d) De entrada axial y salida periférica: Este tipo de ciclones proporcionan un flujo directo que es muy adecuado para conectarlos a fuentes de gran volumen, donde los cambios en la dirección del gas podrían ser un inconveniente (Fuente: Diquima, 2008).

En la **Figura N° 5**, que a continuación se expone, se detallan las diferentes configuraciones de entrada y salida referentes a los separadores ciclónicos anteriormente mencionados.

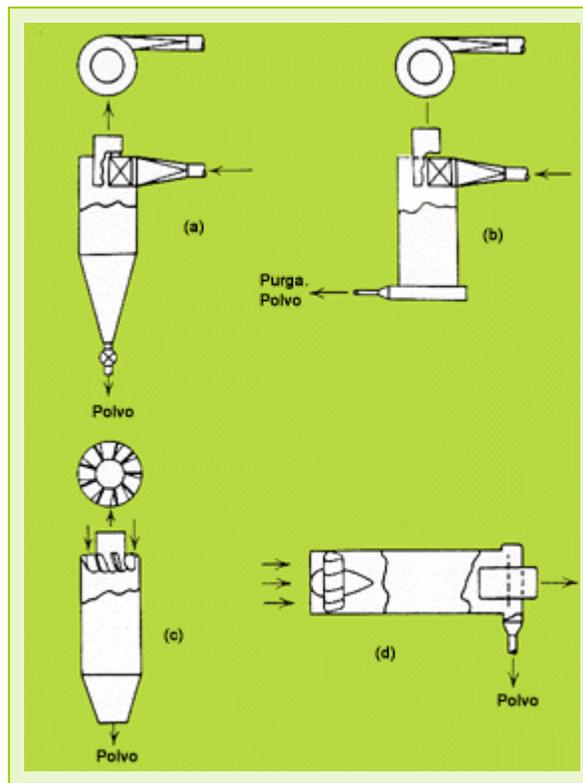


Figura N° 5: Disposición geométrica de los separadores ciclónicos.

Fuente: DIQUIMA, (2008)

También existe una segunda clasificación de los separadores ciclónicos en función a su eficiencia, ya que esta está determinada en gran manera por el tamaño del ciclón. Se ha comprobado que los ciclones de menos diámetro son los que proporcionan mejores eficiencia de separación de partículas. Asimismo, se observa que la altura total del equipo también afecta la eficiencia, aumentando esta última con la altura (Fuente: Diquima, 2008).

Según el criterio anteriormente mencionado se pueden mencionar los siguientes tipos:

- Muy eficientes: dando una eficiencia entre el 98 y 99%.
- Moderadamente eficientes: dando una eficiencia entre el 70 y 80%.
- De baja Eficiencia: dando una eficiencia alrededor del 50%.

Es importante destacar que también se separa el funcionamiento de los ciclones por la trayectoria de la alimentación dentro del ciclón, se divide de la siguiente manera:

- De flujo descendente: La alimentación entra al ciclón de manera tangencial o axial, y es impulsada a través de este de manera descendente. Este tipo de ciclón se utiliza mayormente cuando se trabaja con relaciones gas líquido elevadas, es decir, donde el gas se alimenta en un caudal mucho mayor al líquido. La alimentación desciende por el cilindro en forma de ciclón, por acción de la fuerza centrífuga, el fluido menos denso forma un vórtice en la parte central del separador y la parte más densa se pega a las paredes del separador y se queda en el fondo por acción de la gravedad. El gas asciende y sale por el tope del separador y el líquido desciende saliendo por el fondo.
- De flujo ascendente: La alimentación entra al ciclón de manera tangencial o axial, y es impulsada a través de esta de manera ascendente. Este tipo de ciclón se utiliza mayormente para relaciones gas líquido bajas, es decir, donde el gas se alimenta al separador en un caudal mucho menor al del líquido. La alimentación asciende por los cilindros en forma de ciclón, el gas queda atrapado en el centro y sale por el tope y el líquido se pega a las paredes del cilindro, forma un nivel dentro del separador y sale por la parte de fondo del separador.

En la **Figura N° 6**, que a continuación se presenta se evidencian las diferencias específicas entre los ciclones de flujo ascendente y los de flujo descendente.

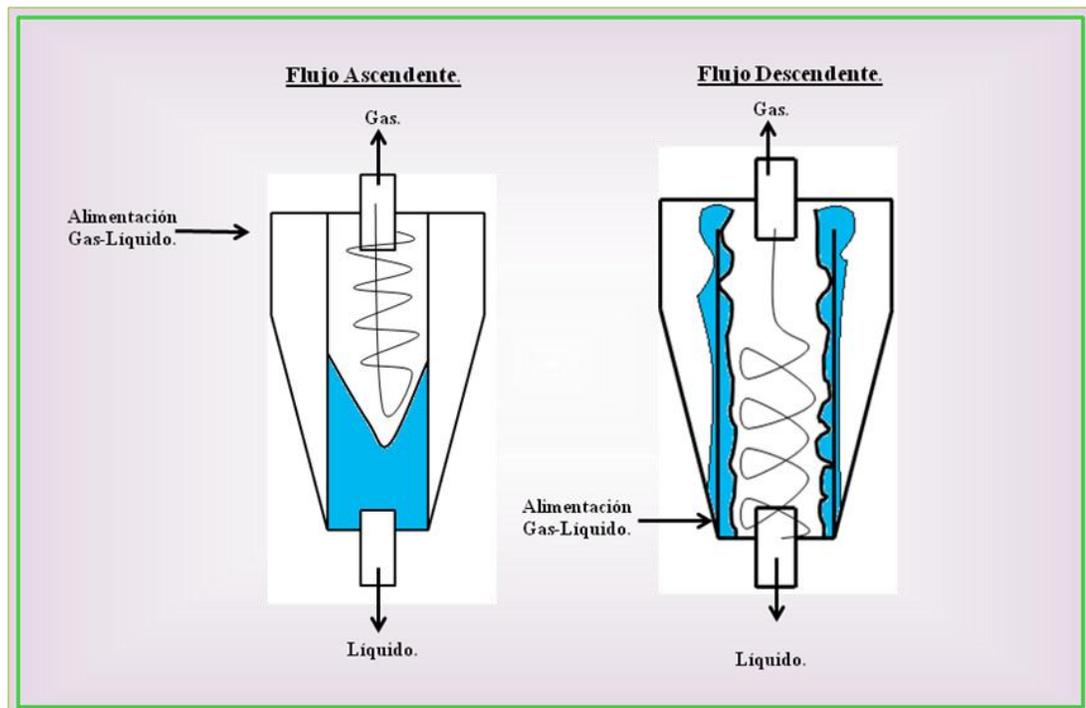


Figura N° 6: Ciclones de flujo ascendente y descendente.

Adaptación propia.

2.7.2. Componentes de un separador ciclónico

Un separador ciclónico está compuesto básicamente por un cilindro vertical con fondo cónico, dotado de una entrada tangencial normalmente rectangular.

El separador ciclónico como anteriormente se mencionó, es un dispositivo sencillo, que no involucra partes móviles ni otros dispositivos internos. Un separador ciclónico generalmente consta de un cilindro instalado verticalmente con una entrada de flujo ubicada tangencialmente con respecto al cilindro e inclinada hacia abajo. En esta entrada fluye a gran velocidad la mezcla multifásica a ser separada. Esta mezcla es en parte gaseosa y en parte líquida. El separador ciclónico consta igualmente de un par de salidas para la fase gaseosa y la parte líquida ubicada en la parte superior e inferior del cuerpo del separador respectivamente (Gómez y col., 2005).

En la **Figura N° 7**, que a continuación se presenta se evidencian los componentes del separador ciclónico anteriormente mencionados.

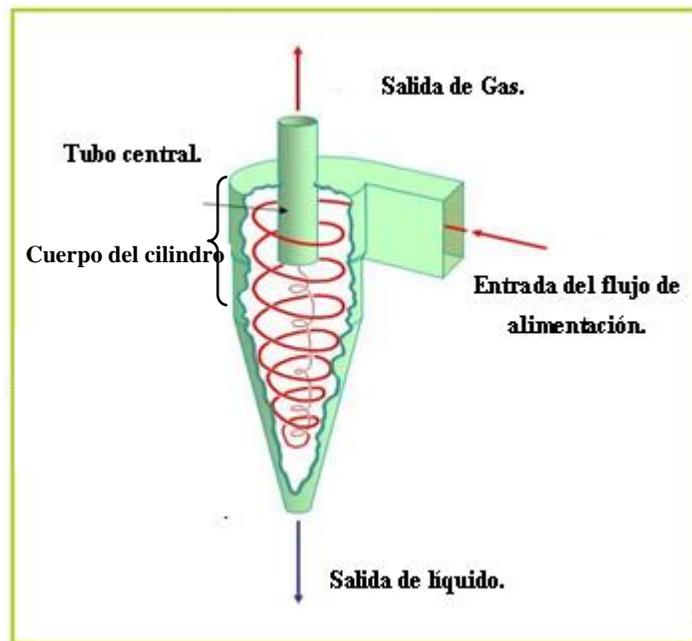


Figura N° 7: Componentes de un separador Ciclónico.

Fuente: Adaptación Gómez y col., 2005.

Los parámetros geométricos de los ciclones también juegan un papel importante en el desempeño de estos equipos en procesos de separación. A continuación se observan en la siguiente figura dichos parámetros.

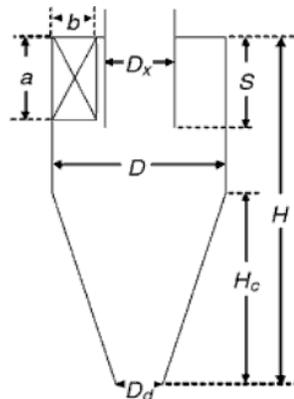


Figura N° 8: Geometría de un separador ciclónico.

Fuente: Hoffman y col., (2002).

Según Hoffman (2002), las dimensiones de la figura anteriormente mencionada son las siguientes:

D: Diámetro del cuerpo (este es el diámetro de la región cilíndrica).

H: Altura total del ciclón (esta es medida desde la salida de líquido por el fondo).

Dx: Diámetro de los cilindros del gas.

S: Longitud de los cilindros del gas (es medida desde el techo de la región de separación).

a: Altura de la zona de entrada al separador.

b: Ancho de la zona de entrada al separador.

Hc: Altura de la sección cónica del separador.

Dd: Diámetro de la salida del líquido (fondo del separador).

2.7.3. Separador multiciclónico

Un separador multiciclónico es aquel destinado a mantener la eficiencia al aumentar el caudal del fluido de trabajo, utilizando el principio de fuerza centrífuga, comúnmente implementa múltiples ciclones de pequeño diámetro, operando en paralelo. En muchos casos los separadores que utilizan la fuerza centrífuga de múltiples ciclones, son recomendados para la separación de un flujo gas líquido (Sister y col., 1993).

La ventaja principal de un separador de múltiples ciclones internos es la construcción compacta, ya que para alcanzar rendimientos comparables con ciclones clásicos se necesita mucho menos volumen y por ende se requiere menos espacio físico de trabajo.

2.7.4. Mapa de operación de un separador ciclónico

De acuerdo con Chirinos (1998) el mapa de operación de los ciclones cilíndricos queda definido por el arrastre de líquido en la corriente gaseosa que sale por el tope

del separador, conocido como LCO por sus siglas en inglés y el arrastre de gas en la corriente de líquido que sale por el fondo del separador, GVF por sus siglas en inglés.

El LCO es un problema que se presenta al trabajar con altas relaciones de caudales gas líquido dentro de un separador y se asume que el GVF por encima de un valor del 10% puede tildar un proceso de separación como negativo, ya que ocasiona problemas en equipos agua abajo que están diseñados para trabajar con flujos de líquido únicamente (Matson, 2008).

Dichas limitaciones están directamente relacionadas con especificaciones de diseño del equipo de separación que permite que este trabaje eficientemente solo dentro de ciertos límites de operación. Es por ello que actualmente se cuenta con modificaciones de diseño de los separadores, basados en pruebas experimentales anteriores, tales como el trabajo de investigación experimental de Matson J. (2008) “Evaluación del desempeño de dos prototipos de separadores ciclónicos gas-líquido”, en el cual se obtienen sugerencias basadas en los datos experimentales tales como colocar el deflector de burbujas en el fondo del separador para evitar el arrate de gas, aumentar la altura de la zona de desalojo de líquido. Además del trabajo experimental de Caliz y col. (2009), “Evaluación de los separadores ciclónicos CYCINT y ciclones múltiples con un sistema agua/aire en el laboratorio de flujo multifásico Norte 6” y el de Valdez y col. (2009), “Evaluación de los separadores ciclónicos CYCINT y ciclones múltiples con un sistema aceite/aire en el laboratorio de flujo multifásico Norte 6”, en los cuales se obtienen datos para el mejoramiento del diseño del separador que consiste en modificar geoméricamente la zona de salida de gas superior de los ciclones, vortex finder y espacio anular de salida para evitar arrastre de líquido, que son comprobados para mejorar la eficiencia de separación en función del LCO y del $GVF > 10\%$ presentes durante la operación del equipo.

En la **Figura N° 9**, que a continuación se presenta se evidencian los límites de operación establecidos para un separador en función de los parámetros LCO y $GVF > 10\%$.

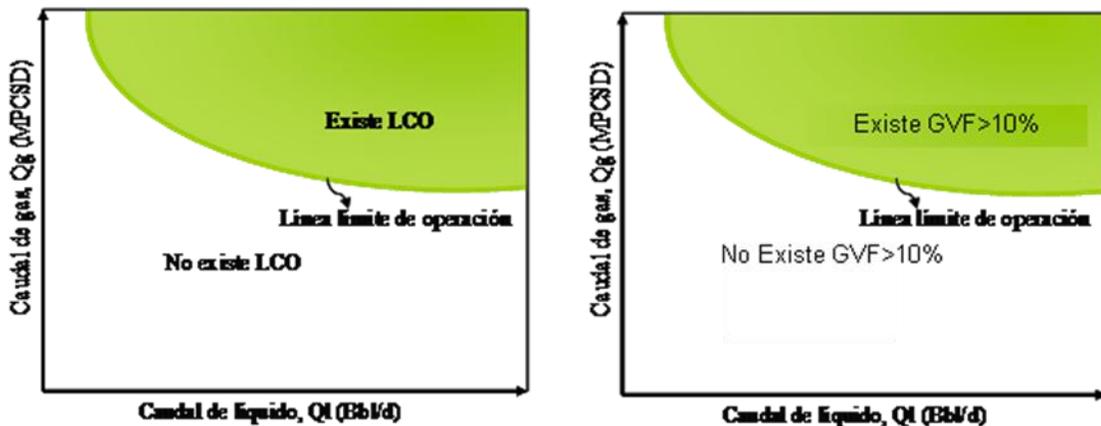


Figura N° 9: Mapa de operación en la evaluación de separadores ciclónicos gas-líquido.

Fuente: Adaptación (Matson 2008).

2.7.5. Ventajas y desventajas de los separadores ciclónicos

Según Hoffman 2002, entre las ventajas y las desventajas de los separadores ciclónicos se encuentran las siguientes:

Ventajas:

- Son equipos económicos y poseen un bajo costo de mantenimiento en la mayoría de las aplicaciones.
- Poseen una estructura compacta.
- Se pueden utilizar bajo condiciones de procesamiento extremas, sobre todo a altas temperaturas y presiones y con componentes de la alimentación químicamente agresivos.
- No tienen partes móviles.
- La caída de presión es constante en estos equipos de separación.
- Pueden ser construidos a partir de casi cualquier material adecuado para el servicio previsto incluyendo placa de acero, fundición de metales, aleaciones, aluminio, plásticos, cerámica, etc.

- Puede ser equipado con elementos que resistan la corrosión tales como el teflón.
- Pueden en algunos casos trabajar con fluidos pegajosos o aglutinantes, con un mantenimiento adecuado.
- Permite separar ciertas partículas sólidas y líquidas, siempre y cuando cuenten con un diseño adecuado.

Desventajas:

- Su eficiencia está limitada al tamaño de la partícula, no es tan eficiente con partículas pequeñas.
- Pueden operar por debajo de las expectativas, si no son diseñados y operados adecuadamente.
- Generan una mayor caída de presión en comparación con otros equipos tales como filtros de manga, lavadores de baja caída de presión, etc.

2.8. SEPARADOR CIMCI

Según Brito y col. (2009), el separador Ciclónico de Múltiples Cilindros de flujo ascendente (CIMCI) es un separador que puede separar sólidos, líquidos y gases a partir de efectos centrífugos. Dicho separador posee un difusor en la entrada que promueve la distribución uniforme del flujo en los ciclones, a su vez estos cilindros son de entradas tangenciales rectangulares las cuales permiten generar fuerzas centrífugas que obligan al fluido a seguir una trayectoria en espiral dentro de los ciclones y disminuye el rompimiento y reentrampamiento de una fase en la otra.

El área de aplicación del separador CIMCI es la separación primaria de corrientes multifásicas a alta y baja presión, manejando hidrocarburos líquidos con viscosidad inferior a 200cP a la temperatura de operación y como preseparator en la medición multifásica (Brito y col. 2009).

2.8.1. Regiones del CIMCI

2.9.1.1 Región de distribución de flujo a la entrada

En la entrada al recipiente a presión, se encuentra un difusor constituido básicamente por una unión tipo T, la cual se encuentra dividida por una placa vertical permitiendo distribuir uniformemente el flujo entre un número par de ciclones cilíndricos. El flujo ingresa a los ciclones a través, de una entrada tangencial rectangular, cuyo diámetro hidráulico asegura una velocidad de entre 45 y 60 pie/s. En la parte inferior de cada ciclón hay un estabilizador de flujo que obliga al fluido a iniciar una trayectoria rotacional uniforme desde la región de alimentación del ciclón y previene la migración del flujo hacia el centro del ciclón debido a la baja presión existente en la zona (Brito y cols, 2009).

2.9.1.2 Región central

En esta región ocurre la separación de las fases básicamente por el efecto centrífugo. La mezcla bifásica ingresa a cada ciclón en forma tangencial, con la cual se logra generar una importante componente tangencial de la velocidad del fluido. Es dicha componente la que genera la fuerza centrífuga que obliga a la fase líquida a dirigirse hacia las paredes del ciclón en una trayectoria espiral ascendente y sale del ciclón por un espacio anular generado entre el cuerpo del ciclón y la salida de gas y es drenada hacia la zona de burbujas del separador, mientras que el gas por ser más liviano, se dirige hacia el centro del ciclón en una trayectoria espiral ascendente y sale a través de los vortex finder o tubos de ascenso del gas, donde es recolectado en la región de gota (Brito y col., 2009).

2.9.1.3 Región de burbujas

Según Brito y col. (2009), la región de burbujas es la parte inferior del separador, que ofrece un volumen de retención de líquido, dándole un tiempo de residencia para permitir que las burbujas de gas asciendan hacia la interfase gas-líquido para su posterior separación.

Además en esta sección se tiene como modificación el implemento de un deflector de burbujas, elaborado en plexiglás que disminuye el arrastre de gas por el fondo, ya que las burbujas de gas chocan con el dispositivo, son dispersadas y luego ascienden a la región central.

2.9.1.4 Región de gotas

Según Brito y col. (2009), la región de gotas se encuentra localizada en la parte superior del separador CIMCI. En esta zona, el área disponible para el gas permite reducir la velocidad de las gotas de líquido que hayan sido arrastradas por la corriente de gas en los ciclones, para que las mismas sean removidas por efectos gravitacionales.

En la **Figura N° 10**, que a continuación se presenta, se evidencia gráficamente cada una de las regiones del separador CIMCI:

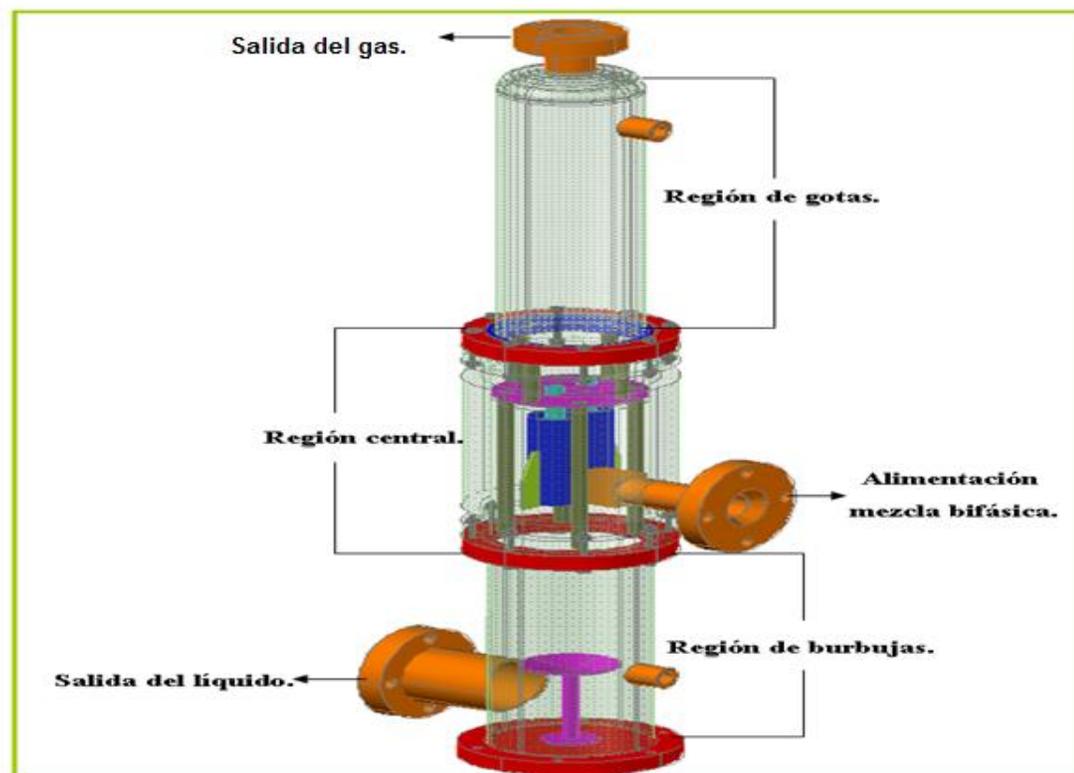


Figura N° 10: Regiones del separador CIMCI.

Fuente: Brito y col. (2009).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el tipo de investigación realizada, abordando el nivel y el diseño de la misma, así como las técnicas e instrumentos que son utilizados para alcanzar los objetivos planteados.

En este Trabajo Especial de Grado se caracterizo el comportamiento de separación del equipo CIMCI, donde se establecieron además los límites de operación en los cuales este equipo es eficiente, mediante la recolección de datos de manera experimental. Además se recolecto información documental para el entendimiento del trabajo de este prototipo de separación.

Para el cumplimiento de los antes mencionado la investigación se organizo como se indica en la **Figura N° 11**, que a continuación se presenta:

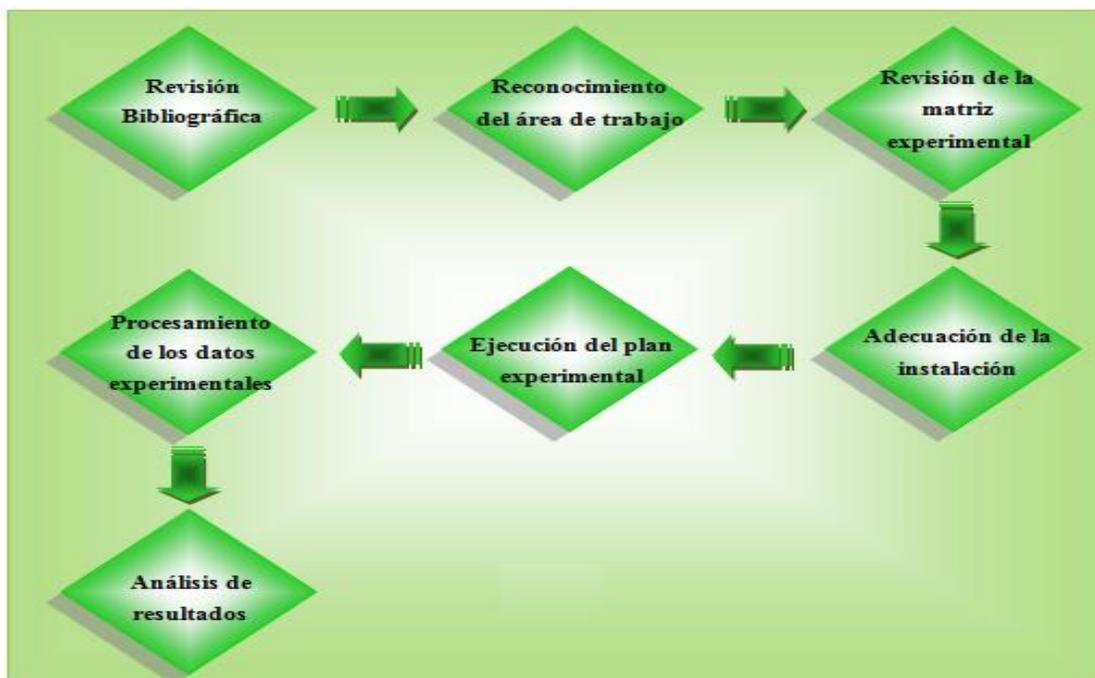


Figura N° 11: Esquema de la metodología utilizada.

Fuente: Adaptación propia.

3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa inicial se encuentra comprendida por la recolección, búsqueda, selección y revisión de la información referente a los conceptos básicos e iniciales para el correcto entendimiento del proceso, así como también las innovaciones recientes referentes a procesos de separación bifásica. En esta etapa se aclara el sentido de los conceptos empleados para la identificación clara y precisa de este trabajo de investigación.

Para ello se cuenta con el acceso a los avances de investigación de PDVSA Intevep, y además se estudian documentos científicos con información nacional e internacional referida al tema. Esta información es adquirida a través del portal de investigación de PDVSA conocido como RIPPET (Red de Información Petrolera y Petroquímica), en el cual se encuentra información sobre monografías, publicaciones periódicas, tesis y trabajos de investigación de diversas publicaciones, tales como:

- Revistas científicas (Society of Petroleum Engineers, Science Direct, etc.).
- Normas PDVSA.
- Normas COVENIN.

Mediante esta búsqueda de información bibliográfica se logran establecer tantos los conocimientos básicos referidos a procesos de separación ciclónica, como el tratamiento que se aplica a los datos experimentales una vez obtenidos, para su posterior análisis.

3.2. RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE TRABAJO

En este segmento se hace necesaria la familiarización con el circuito de separación de gas líquido ubicado en el Laboratorio Norte 6 de PDVSA Intevep, donde se realizaron las pruebas experimentales. Todo el proceso de familiarización se realizó con la finalidad de obtener la destreza y habilidad de manipular los diferentes equipos existentes en el laboratorio para operar de una manera correcta el sistema.

flujo de aire es controlado mediante el porcentaje de apertura de cualquiera de las válvulas de control de flujo y es medido mediante una placa orificio integral o un medidor de flujo tipo vortex, dependiendo de los rangos de flujo a utilizar (Caliz y col., 2009).

3.2.2. Módulo de bombeo

Está constituido por dos tanques de acero al carbono de aproximadamente 2000 litros de capacidad bruta cada uno T-0301/T-0302 (ver Anexo 2). Dichos tanques se encuentran interconectados a las bombas y al sistema mediante tuberías de acero al carbono de 4 y 2 pulgadas de diámetro nominal. Para el proceso de transferencia y manejo de líquido, el circuito cuenta con tres bombas de desplazamiento positivo de engranajes internos P-0301, P-0302, P-0303 marca Viking, acopladas a motores eléctricos equipados con cajas de engranajes y variadores de frecuencia con la finalidad de variar el flujo a manejar en el circuito. El fluido proveniente de las bombas pasa a través de una serie de medidores de flujo FT-0301A, FT-0301B, FT-0301C, FT-0301D, tipo Coriolis, marca Micromotion, que permiten medir el flujo másico de líquido y los mismos están equipados con sensores de medición de densidad y temperatura (Caliz y col., 2009).

3.2.3. Módulo de separación

Esta sección del circuito comienza a partir del punto de mezcla donde los fluidos de líquido y gas se unen para formar el flujo bifásico, mediante una unión tipo T (ver Anexo 3). El gas es inyectado por la parte superior mientras que el líquido circula por la parte central. Luego la mezcla aire líquido hace el recorrido por la tubería de dos pulgadas de diámetro (Caliz y cols, 2009).

La sección está constituida por el separador CIMCI de flujo ascendente, donde se realiza el proceso de separación, en el cual el líquido fluye hacia una sección donde puede capturarse el holdup (líquido), donde se pesa la masa de líquido recolectado para calcular el porcentaje de volumen de gas arrastrado, donde se tendrá una medida indirecta de la eficiencia del separador CIMCI de flujo ascendente y luego el líquido

pueda ser enviado nuevamente a los tanques de almacenamiento. Igualmente esta sección cuenta con una trampa de líquido V-0303 en la cual es retirado el líquido que es arrastrado por el gas, este es un dispositivo conformado por una sección cilíndrica, fabricada en plexiglás, conectada a un cono metálico, en el cual la entrada tangencial promueve la formación de vórtice y el aumento de la velocidad tangencial del fluido para facilitar la separación de las gotas de líquido arrastradas por el gas (Matson, 2008). Posteriormente la corriente de gas ya sin líquido se retira del sistema y fluye a través de las placas orificio de salida FT-0302A, FT-0302B cuya selección depende del caudal de aire trabajado.

En la **Figura N° 13**, que se presenta a continuación, se evidencia el modulo de separación del circuito de separación gas-líquido.

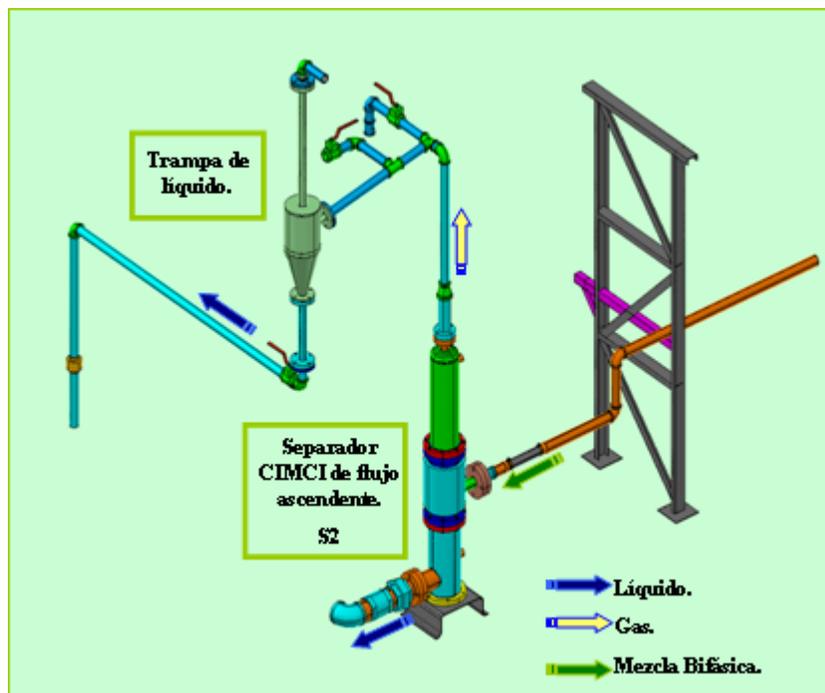


Figura N° 13: Separador CIMCI de flujo ascendente y trampa de líquido.

Fuente: PDVSA Intevep (2010).

3.2.4. Módulo de adquisición de datos y control

El sistema de adquisición de datos y control del circuito de separación gas-líquido, está compuesto por un computador digital PC 3000, 233 MHZ, procesador Pentium

II; 64 MB RAM, un equipo para acondicionamiento de señales SCXI y cuatro controladores Bailey. El monitoreo y registro de las variables medidas del circuito es realizado por un software de programación orientado a objetos denominado LabVIEW versión 5.1, además de la adquisición de los datos permite realizar el encendido de las bombas de manera remota y verificar los estados de seguridad en puntos estratégicos de la planta (Caliz y col., 2009).

En el circuito de separación de gas-líquido se encuentran operando cuatro lazos de control, el control de inyección de líquido e inyección de gas funcionan en lazo abierto, mientras que el control de presión y el control de nivel del separador trabajan en lazo cerrado (Caliz y col., 2009).

La planta requiere un total de 39 señales analógicas, entre entradas y salidas; éstas se almacenan en el computador antes mencionado a una velocidad de seis lecturas por segundo en forma continua para las señales lentas y seiscientas lecturas por segundo las señales rápidas. La información se registra en el disco en archivos electrónicos con un formato “Excel” para facilitar su uso al momento de analizar los datos. Una vez finalizada la adquisición de datos, estos archivos se procesan y se convierten a formato Excel para WINDOWS, mediante el uso de la aplicación “postprocesamiento”. Cada grupo de señales se guarda en un archivo diferente y se le asignan nombres automáticamente de acuerdo a la fecha, hora y condición a la que se esté trabajando (transitoria o estacionaria) (Caliz y col., 2009).

La tarjeta de adquisición de datos instalada en la computadora es PCI-6031 (señales rápidas) y PCI-MIO-16XE-10 (señales lentas), con sus respectivos módulos de acondicionamiento de señales SCB-100 para entradas analógicas rápidas, SCXI-1102B para entradas analógicas lentas, SCXI-1160 para salidas digitales, SCXI-1162HV para entradas digitales y SCXI-1124 para salidas analógicas, todas son del fabricante National Instrument (Caliz y col., 2009).

Durante la operación del circuito de separación la pantalla principal de la computadora presenta el esquema de instrumentación de la planta, mostrando continuamente los valores de las variables más relevantes del proceso: temperatura,

presión, nivel, flujo de gas, flujo de líquido, fracción de líquido, velocidad superficial del líquido y del gas. Además, proporciona al usuario la opción de poder ver cada una de las variables con sus respectivas gráficas, tanto para señales lentas como para las señales rápidas, desarrolladas en LabVIEW v5.1 (Caliz y col., 2009).

En la **Figura N° 14**, que a continuación se presenta, se puede observar la pantalla principal del módulo de adquisición de datos y control, que se muestra al operador del circuito.

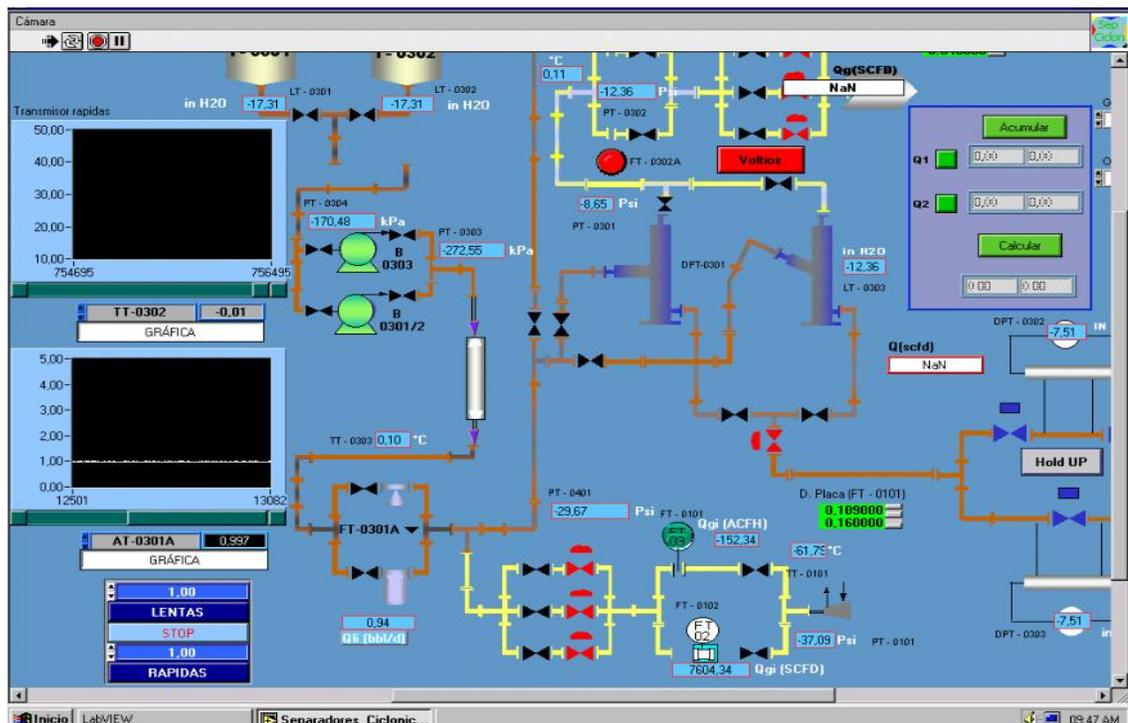


Figura N° 14: Sistema de adquisición de datos y control del sistema de separación gas líquido.

Fuente: PDVSA Intevep (2010).

3.3. REVISIÓN DE LA MATRIZ EXPERIMENTAL

El desarrollo de las pruebas de separación utilizando el separador CIMCI de flujo ascendente se plantea en función de la determinación de la zona de operación del equipo, basados en el análisis cualitativo del LCO y el cuantitativo del GVF, además de la caída de presión que se genere dentro del equipo. Para llevar a cabo las pruebas se realizó una matriz con distintos puntos experimentales de operación donde se

pueda evaluar el desempeño del separador CIMCI de flujo ascendente para su condición de diseño, operación y si es posible, sobre su capacidad de diseño.

Todo lo anteriormente mencionado se realiza con la finalidad de realizar ajustes posteriores en la herramienta de diseño del equipo, si es necesario.

En la **Tabla N° 1**, que a continuación se presenta, se evidencia la condición de operación y diseño del separador a evaluar en este trabajo especial de grado.

Variable	Mínimo	Nominal	Máximo	Diseño
Flujo de gas (MPCSD)	10	30	50	50
Flujo de líquido (BPD)	100	700	2000	700
Presión (lpcm)	10	15	20	15
Temperatura (°F)	69	76	80	76

Tabla N° 1: Condiciones de proceso para el diseño del separador de Norte 6.

Fuente: Brito y col., (2009).

Con el fin de determinar la ventana operacional del equipo se propuso la siguiente matriz experimental, presentada en la **Tabla N° 2**:

. Tabla N°2: Matriz de pruebas experimentales preliminar.

Prueba.	Qg (MPCSD).	GLR.	QI (BPD).
6087_S2_B_001	10	20,0	500,0
6087_S2_B_002	10	50,0	200,0
6087_S2_B_003	10	100,0	100,0
6087_S2_B_004	10	350,0	28,6
6087_S2_B_005	10	500,0	20,0
6087_S2_B_006	10	700,0	14,3
6087_S2_B_007	25	20,0	1250,0
6087_S2_B_008	25	50,0	500,0
6087_S2_B_009	25	100,0	250,0
6087_S2_B_010	25	350,0	71,4
6087_S2_B_011	25	500,0	50,0
6087_S2_B_012	25	700,0	35,7
6087_S2_B_013	35	20,0	1750,0
6087_S2_B_014	35	50,0	700,0
6087_S2_B_015	35	100,0	350,0
6087_S2_B_016	35	350,0	100,0
6087_S2_B_017	35	500,0	70,0
6087_S2_B_018	35	700,0	50,0

Prueba.	Qg (MPCSD).	GLR.	QI (BPD).
6087_S2_B_019	50	20,0	2500,0
6087_S2_B_020	50	50,0	1000,0
6087_S2_B_021	50	100,0	500,0
6087_S2_B_022	50	350,0	142,9
6087_S2_B_023	50	500,0	100,0
6087_S2_B_024	50	700,0	71,4
6087_S2_B_025	70	20,0	3500,0
6087_S2_B_026	70	50,0	1400,0
6087_S2_B_027	70	100,0	700,0
6087_S2_B_028	70	350,0	200,0
6087_S2_B_029	70	500,0	140,0
6087_S2_B_030	70	700,0	100,0

Tabla N° 2: Matriz de pruebas experimentales preliminar (Continuación).

Cabe acotar que en dicha matriz experimental, se trabaja con caudales de gas de 10, 25, 35, 50 y 70 MPCSD, se pretende trabajar con seis relaciones gas-líquido de 20, 50, 100, 350, 500, 700 PCS/BPD, las cuales permanecen fijas para cada caudal de gas trabajado, lo que da en consecuencia diferentes flujos de líquido establecidos entre 3500 y 14,3 BPD.

Esta matriz de pruebas experimentales se sometió a una evaluación hidráulica empleando el simulador PIPESIM, reproduciendo la red de tuberías del circuito experimental de Norte 6, debido a que es necesario conocer el patrón de flujo que tendrá la alimentación del separador, al igual que la presión que debería corresponder a cada punto experimental por seguridad no se debe exceder una presión de trabajo de 15 psig.

La matriz experimental anteriormente mencionada tiene en consecuencia 27 puntos experimentales, como se muestra en la **Tabla N° 3:**

Tabla N° 3: Matriz de pruebas experimentales.

Prueba.	Qg (MPCSD).	GLR.	QI (BPD).
6087_S2_B_001	10	20,0	500,0
6087_S2_B_002	10	50,0	200,0
6087_S2_B_003	10	100,0	100,0
6087_S2_B_004	10	350,0	28,6
6087_S2_B_005	10	500,0	20,0

Prueba.	Qg (MPCSD).	GLR.	QI (BPD).
6087_S2_B_006	10	700,0	14,3
6087_S2_B_007	25	20,0	1250,0
6087_S2_B_008	25	50,0	500,0
6087_S2_B_009	25	100,0	250,0
6087_S2_B_010	25	350,0	71,4
6087_S2_B_011	25	500,0	50,0
6087_S2_B_012	25	700,0	35,7
6087_S2_B_014	35	50,0	700,0
6087_S2_B_015	35	100,0	350,0
6087_S2_B_016	35	350,0	100,0
6087_S2_B_017	35	500,0	70,0
6087_S2_B_018	35	700,0	50,0
6087_S2_B_020	50	50,0	1000,0
6087_S2_B_021	50	100,0	500,0
6087_S2_B_022	50	350,0	142,9
6087_S2_B_023	50	500,0	100,0
6087_S2_B_024	50	700,0	71,4
6087_S2_B_026	70	50,0	1400,0
6087_S2_B_027	70	100,0	700,0
6087_S2_B_028	70	350,0	200,0
6087_S2_B_029	70	500,0	140,0
6087_S2_B_030	70	700,0	100,0

Tabla N°3: Matriz de pruebas experimentales (Continuación).

3.4. ADECUACIÓN DE LA INSTALACIÓN

Como paso previo a la realización de las pruebas experimentales es de suma importancia la adecuación y el acondicionamiento del circuito de separación gas líquido, para lograr lo antes mencionado es necesaria la verificación y calibración de las unidades de medida de todos los transmisores involucrados en el proceso de separación gas líquido utilizando el separador CIMCI de flujo ascendente, todo esto con el fin de garantizar la confiabilidad y exactitud de las mediciones y los resultados obtenidos.

Los transmisores inteligentes, cuentan con un microprocesador, es por ello que son capaces no solo de transmitir la señal de proceso, si no de permitir la configuración, leer valores en el momento de las pruebas y cambiar el rango del instrumento a distancia. Mientras que los transmisores no inteligentes deben ser ajustados

manualmente mediante el instrumento de medición y calibración GULTON-STATHAN con una velocidad de 600 Hz. En el circuito se cuenta con transmisores digitales inteligentes, marca Rosemount y con transmisores digitales no inteligentes, marca GULTON-STATHAN, los cuales son utilizados para medir diferentes variables del proceso como presión, temperatura, nivel o flujo másico, y transmitirla digitalmente a un instrumento receptor.

Para realizar la calibración de los transmisores inteligentes se utiliza un HART-375 (Highway Addressable Remote Transducer). La unidad HART al ser conectada a este tipo de transmisores, permite leer el rango del instrumento y simular cambios en la variable de proceso, los cuales son verificados en la variable de salida.

La verificación de los transmisores a utilizar en el circuito de separación gas-líquido se basa en conectar el comunicador HART al transmisor de interés, posteriormente se lee el rango y se verifica a través del SCADA con la pantalla de labVIEW 5.1., luego se simula una corriente entre 4 y 20 mA, se entiende que 20mA representa el valor máximo de lectura del transmisor, mientras que 4 mA representa el valor mínimo de lectura del transmisor, que debería coincidir con el rango del equipo, de lo contrario el transmisor presenta fallas.

En la **Tabla N° 4**, se muestran los transmisores del sistema de separación gas líquido que son verificados con respecto a las señales lentas:

Tabla N° 4: Instrumentación del circuito de separación gas líquido para el equipo CIMCI de flujo ascendente, variables lentas.

TAG.	Servicio.	Rango.
LT-0301.	Nivel del tanque de almacenamiento T-0301.	0-70”H2O.
LT-0302.	Nivel del tanque de almacenamiento T-0302.	0-70”H2O.

TAG.	Servicio.	Rango.
PT-0304	Presión de succión de bomba de líquido P-0301, P0302 o P0303	0–689,5Kpa
PT-0303	Presión de descarga de bomba de líquido P-0301, P0302 o P0303	0-1103Kpa
TT-0303	Temperatura de líquido	10 – 50°C
AT-0301 A	Densidad del líquido (1/2")	0-5 gr/cc
AT-0301C	Densidad del líquido (3")	0-5 gr/cc
TT-0101	Temperatura de gas de inyección	10 – 50°C
PT-0101	Presión de inyección de gas	0-150 psi
FT-0101	Medidor de flujo inyección de gas (placa de orificio)	0 – 250" H ₂ O
PT-0401	Presión de mezcla	0-120 psi
DPT-0301	Dif. Presión ent./sal. del separador	0–1000 "H ₂ O
LT-0303	Nivel del separador	0 – 50 "H ₂ O
PT-0301	Presión de tope en el separador	0 – 35 psig

TAG.	Servicio.	Rango.
TT-0301	Temperatura de gas de salida del separador.	10-50°C.
PT-0302	Presión salida separador	0 – 50 psig.
FT-0302A	Flujo de salida de gas 1/2"	0–300 "H2O
FT-0302B	Flujo de salida de gas 1"	0 – 300 "H2O
FT-0301A.	Flujo másico de líquido (3")	0-40000kg/h
FT-0301D.	Flujo másico de líquido (3")	0-40000kg/h

Tabla N°4: Instrumentación del circuito de separación gas líquido para el equipo CIMCI de flujo ascendente, variables lentas (Continuación).

En la **Tabla N° 5**, se muestran los transmisores del sistema de separación gas líquido que son verificados con respecto a las señales rápidas del circuito:

TAG.	Servicio.	Rango.
PT-0305.	Medidor de presión del Hold up.	0- 248 psig.
DPT-0303.	Captura en Bypass.	0-30" H2O.
DPT-0304.	Captura en Hold up..	0-30" H2O.
TT-0302	Medidor de temperatura del Hold up.	0-10°C.

Tabla N° 5: Instrumentación del circuito de separación gas líquido para el equipo CIMCI de flujo ascendente, variables rápidas.

3.5. EJECUCIÓN DEL PLAN EXPERIMENTAL

El circuito de separación gas líquido se opera con el separador CIMCI de flujo ascendente el cual es un equipo de separación primaria, además se cuenta con un equipo de separación secundaria el cual es la trampa de líquido.

Las condiciones de operación del proceso en el circuito de separación gas líquido son las siguientes:

- Temperatura ambiente (aproximadamente 77°F).
- Presión: 15 psig.
- Fase gas: aire.
- Fase líquida: agua.
- Diámetro de la tubería: 2 pulgadas.

3.5.1. Identificación de las pruebas experimentales

Se realiza para cada prueba experimental una identificación, ya que de cada una se obtiene un registro de datos en digital para las señales lentas (B) y rápidas (HP), en tablas de formato EXCEL como anteriormente se mencionó. Además, para cada prueba experimental se toma un video y se realizan anotaciones de lo sucedido dentro del separador y en las corrientes de salida. Es por esta razón que se crea una identificación de las pruebas con el fin de estandarizar y organizar todos los puntos experimentales que son evaluados con el separador CIMCI.

En esta identificación se coloca el número del proyecto, el separador que se utiliza, tipo de señal y el número de la experiencia a realizar. Tal y como se muestra en la siguiente figura:

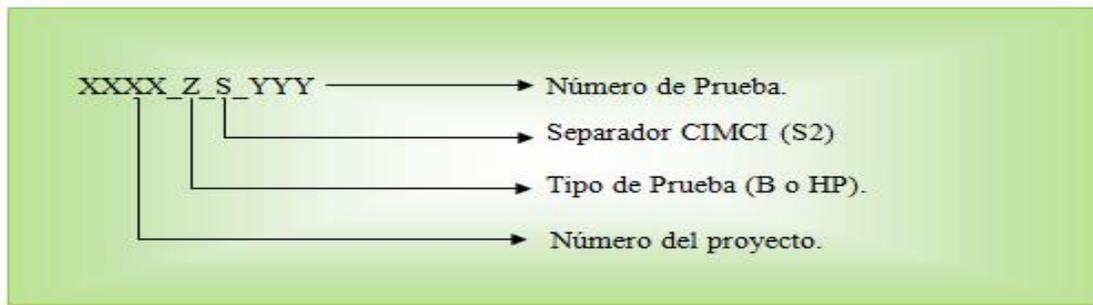


Figura N° 15: Identificación utilizada en las pruebas experimentales.

Fuente: Adaptación Matson (2008).

3.5.2. Adquisición de los datos experimentales

La adquisición de los datos o valores de las variables experimentales de las pruebas realizadas con el separador CIMCI de flujo ascendente, son observadas mediante la pantalla del computador con el software LabVIEW 5.1 a través del sistema de control y adquisición de datos (SCADA), el cual funciona y permite medir y grabar las señales de entrada del sistema.

Para las señales lentas del sistema los sensores utilizados poseen una frecuencia de captación de 6 Hz (Matson, 2008), y estas son grabadas durante un tiempo de tres minutos. Mientras que para las señales rápidas del sistema los sensores utilizados poseen una frecuencia de captación de 120 Hz (Matson, 2008), estas son grabadas durante un tiempo de un minuto.

De igual manera se realiza una descripción breve en el cuaderno de laboratorio, de los datos más relevantes de cada prueba experimental, tal como caudal de entrada y salida de gas, caudal de líquido trabajado, presión del separador, caída de presión en el separador, porcentaje de inyección de gas, porcentaje de inyección de líquido porcentaje del control de presión, porcentaje del controlador de nivel dentro del separador, así como de los respectivos K_p y K_i de cada sistema de control. A su vez se realizan anotaciones en el cuaderno del laboratorio, que indican el comportamiento del equipo con cada flujo de alimentación trabajada, si existe o no existe arrastre tanto de gas como de líquido y el patrón de entrada de alimentación al separador en cada punto experimental.

Adicionalmente se filma un video con el comportamiento del separador en cada punto experimental como registro para posteriores investigaciones. Cabe acotar que cada prueba es filmada, grabada e identificada según la codificación anteriormente mencionada.

3.5.3. Procedimiento de operación de las pruebas experimentales

El procedimiento de operación para cada prueba experimental se realiza mediante un procedimiento de trabajo, el cual es un ciclo de actividades que involucran al circuito de separación gas líquido y al panel de control, para garantizar tanto el correcto desarrollo de las pruebas como la seguridad del equipo y del personal que labora en la planta.

La **Figura N° 16**, que se presenta a continuación se describe de manera general el procedimiento de trabajo durante las pruebas experimentales.

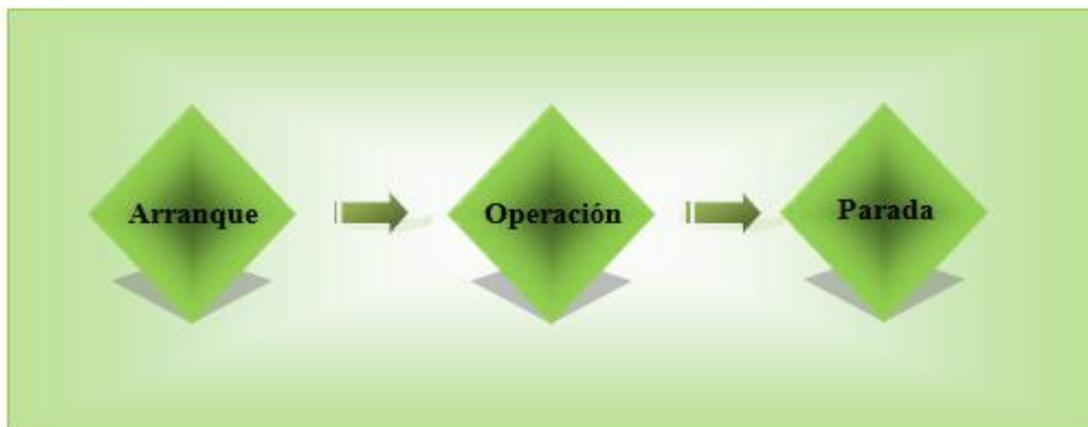


Figura N° 16: Procedimiento de Operación durante las pruebas experimentales.

Fuente: Adaptación propia.

Durante las pruebas experimentales se implantan los procedimientos de arranque (Ver Anexo 4), operación (Ver Anexo 5) y parada de planta (Ver Anexo 6), que se establecen en el manual del laboratorio.

3.6. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Los datos experimentales obtenidos de cada prueba adquiridos a través del Sistema de Control y Adquisición de Datos (SCADA), son procesados en formato Excel mediante Visual Basic de Excel, donde se calcula en cada prueba, el valor máximo, mínimo, promedio y desviación estándar de cada variable medida, tanto lentas como rápidas.

Para la obtención de los diferentes valores de las variables de interés se trabaja tanto con los valores obtenidos en el formato de Excel en cada una de las pruebas experimentales, como con algunas herramientas de este programa para obtener valores finales de interés, tales como el porcentaje de gas arrastrado, la caída de presión, la cantidad de movimiento a la entrada, valores de fuerza G, que luego del análisis permite cumplir con los objetivos anteriormente planteados en este Trabajo Especial de Grado. Los procedimientos son los siguientes:

3.6.1. Determinación de la eficiencia de separación de líquido

La eficiencia de separación de líquido se determina de una manera cualitativa, donde se delimita la línea de operación del separador en función de la visualización de la primera gota de líquido en la trampa de líquido del circuito de separación.

Los caudales de líquidos serán medidos a través de medidores tipo Coriolis que indican tanto densidad como caudal volumétrico de líquido en barriles por día.

3.6.2. Determinación de la eficiencia de separación de Gas

La eficiencia de separación de gas se realiza de manera cuantitativa en base al arrastre de gas que se presenta por el fondo del separador CIMCI de flujo ascendente. Cabe acotar que esta eficiencia es determinada en función de la medida de fracción de gas arrastrada por el líquido como se describió en el capítulo anterior.

En este trabajo Especial de Grado se considera que una fracción de gas arrastrado o GVF menor al 10%, es un punto de operación eficiente dentro del separador CIMCI,

mientras que un GVF mayor al 10% es un punto de operación ineficiente o poco óptimo para el desempeño del equipo.

3.6.3. Determinación de los caudales reales de gas y líquido

Para la determinación de los caudales de líquido y gas reales que permitan obtener una eficiencia de separación adecuada dentro del separador CIMCI de flujo ascendente, se hace necesario el estudio de su comportamiento, es decir, si se presenta arrastre de gas o arrastre de líquido en los diferentes puntos experimentales de la matriz anteriormente mencionada, en función del caudal de líquido que será medido a través del medidor tipo Coriolis y del caudal de gas que será medido por medio de una placa orificio.

Mediante este procedimiento se determinan los caudales de gas y líquido en los cuales el separador trabaja eficientemente.

3.6.4. Determinación de la caída de presión

La caída de presión dentro del separador es medida en cada punto experimental a través del sensor transmisor de caída de presión DPT-0301, el cual registra valores de la diferencia de presión entre la entrada de la alimentación y la salida de gas del separador CIMCI de flujo ascendente. Esta misma es medida en pulgadas de agua y es transformada a unidades de lpc, para su posterior análisis. Cabe acotar que según Caliz y col. (2009) este valor de caída de presión deber estar en un rango de 1 a 5 lpc para este tipo de separadores multiciclónicos.

3.6.5. Determinación de la fuerza centrífuga y flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.

La fuerza centrífuga y el flujo de cantidad de movimiento se determinan para cada punto experimental de la matriz, una vez observado el comportamiento del separador. Se calcula la fuerza centrífuga mediante la ecuación 11 y el flujo cantidad de movimiento por unidad de área mediante la ecuación 13, anteriormente mencionadas de los puntos experimentales a la entrada del separador CIMCI de flujo ascendente.

3.7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del procesamiento de los datos experimentales con respecto al proceso de separación en el separador CIMCI de flujo ascendente, son analizados cualitativa y cuantitativamente.

Los resultados cualitativos son estudiados y debidamente analizados a partir de las anotaciones de los aspectos más importantes o relevantes durante cada prueba experimental, que están plasmadas tanto en el cuaderno de laboratorio como en el video de cada prueba. En el análisis cualitativo esta descrita la presencia o ausencia de líquido en la trampa de líquido.

Mientras que los análisis cuantitativos están determinados a partir de las mediciones y el continuo procesamiento de los datos de cada uno de los puntos experimentales. Los principales datos medidos se utilizan para calcular la fracción de gas arrastrada por el líquido (GVF), el caudal de gas, la fuerza centrífuga y la cantidad de movimiento en la entrada del separador.

Dichos valores cualitativos y cuantitativos se realizan con el fin de obtener la ventana operacional real del equipo de separación CIMCI de flujo ascendente, la cual se establece en rangos de caudales experimentales de líquido y gas donde no se observa la presencia de líquido en la trampa de líquido y a su vez el GVF sea menor al 10%.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados de cada uno de los diferentes datos obtenidos durante el proceso experimental de este Trabajo Especial de Grado, es dividido para su estudio como anteriormente se mencionó, en cualitativos y cuantitativos, según el registro y procesamiento de los datos. Los resultados cualitativos son los obtenidos a partir de las anotaciones de los aspectos más importantes o relevantes durante cada prueba experimental, que están plasmadas tanto en el cuaderno de laboratorio como en el video de cada prueba. En el análisis cualitativo estará descrita la presencia o ausencia de líquido en la trampa de líquido, al igual que adicionalmente se obtendrá según el comportamiento experimental, la ubicación de cada patrón de flujo desarrollado u obtenido en cada punto de la matriz de pruebas anteriormente mencionada en la **Tabla N° 3**, mediante la observación de la región de entrada al separador de la alimentación bifásica, que posteriormente será comparado con el obtenido a través del mapa de patrón de flujo de Taitel y Dukler mediante la evaluación hidráulica realizada con el simulador PIPESIM. Además de describir el comportamiento de cada una de las regiones del separador para cada patrón de flujo evidenciado.

Mientras que los resultados cuantitativos son los obtenidos a partir de las mediciones y el continuo procesamiento de los datos de cada uno de los puntos experimentales de la matriz de prueba. Los principales datos experimentales medidos se utilizan para calcular la fracción de gas arrastrada por el líquido (GVF), los caudales de gas, la fuerza centrífuga y la cantidad de movimiento en la entrada del separador, en donde se analiza el comportamiento del separador para los distintos valores de las variables anteriormente mencionadas.

Estos resultados cualitativos y cuantitativos permiten describir el comportamiento del proceso de separación que se lleva a cabo a través del separador CIMCI de flujo ascendente, para diferentes caudales de gas y de líquido, lo que permitirá cumplir con lo establecido inicialmente en este Trabajo Especial de Grado.

Es necesario mencionar que los puntos experimentales de la matriz en donde se asociaba un caudal de flujo mayor a 700 BPD, no pudieron ser evaluados ya que el separador presentaba vibraciones que comprometían la integridad mecánica de la estructura, presentando riesgos mayores para el personal que labora en el laboratorio. Es por ello que se trabajó en la práctica con una matriz experimental de 24 puntos experimentales.

A continuación se exponen los diferentes análisis para cada uno de los factores anteriormente mencionados, con el fin de obtener la evaluación final del prototipo de separación CIMCI de flujo ascendente.

4.1. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO DE SEPARADOR CIMCI DE FLUJO ASCENDENTE.

4.1.1. Mapa de operación del prototipo de separación CIMCI de flujo ascendente.

La razón más importante a la hora de realizar un proceso de separación con un separador que tenga múltiples ciclones operando en paralelo es que se puede trabajar con una mayor cantidad de flujo manteniendo la eficiencia de separación, además que este requiere un espacio físico reducido, lo que es ideal en instalaciones costa afuera.

El mapa de operación del equipo de separación CIMCI de flujo ascendente está determinado por el inicio de arrastre de líquido por la corriente de gas que sale del separador y una fracción de arrastre de gas por la corriente de líquido que sale del separador mayor a 10 %. En la figura que se muestra a continuación se evidencia el mapa de patrón de flujo del separador CIMCI de flujo ascendente.

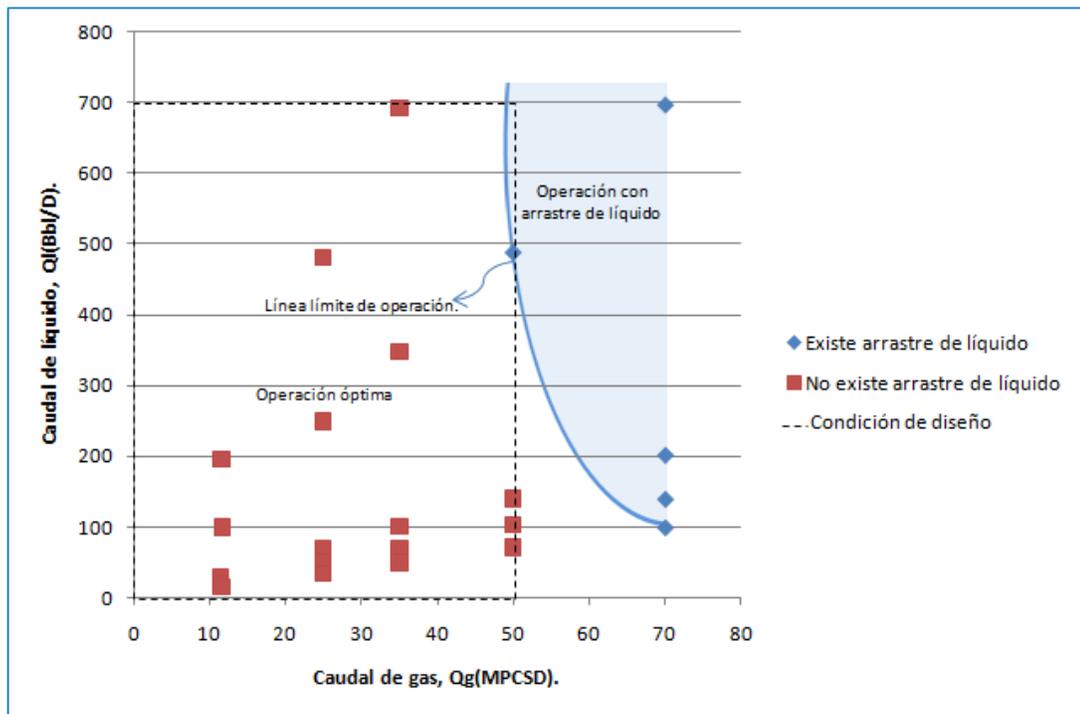


Figura N° 17: Mapa de operación del prototipo de separador CIMCI de flujo ascendente.

En la figura anteriormente mostrada se evidencian la zona de operación del separador CIMCI de flujo ascendente, la cual está limitada por la presencia de arrastre de líquido por la corriente de gas, para los diferentes puntos experimentales de gas y líquido trabajados.

Existe la presencia de arrastre de líquido por la corriente de gas que sale del separador, en el límite de flujo de gas de la ventana de operación para la cual fue diseñado el equipo de separación CIMCI de flujo ascendente.

4.1.2. Determinación de la eficiencia de separación de líquido.

Como se mencionó anteriormente la eficiencia de separación de líquido estará limitada o establecida en función del arrastre de líquido por la corriente de salida del gas del separador CIMCI, en donde al observar la primera gota de líquido en la trampa de líquido se identificará al separador CIMCI de flujo ascendente como ineficiente en cuanto a la separación de líquido para el punto de la matriz experimental que se esté trabajando. En la figura que se evidencia a continuación se

presenta de una manera grafica la identificación de los puntos de eficiencia o ineficiencia de separación de líquido con respecto al separador CIMCI de flujo ascendente.

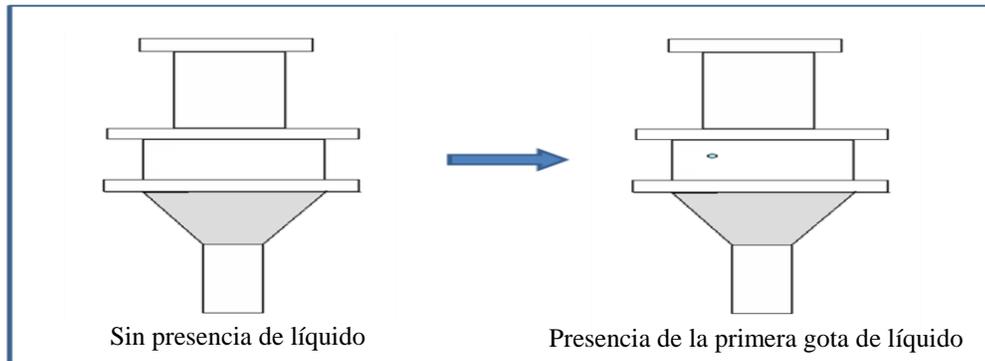


Figura N° 18: Identificación del arrastre de líquido en la trampa de líquido.

Fuente: Adaptación Matson (2008).

Se tomó para cada punto experimental el video de la trampa de líquido además de que se realizaron anotaciones y dibujos en el cuaderno de laboratorio, en el cual se describe si se evidencia o no el arrastre de líquido por la corriente de salida del gas del separador.

Mediante el procedimiento anteriormente mencionado se realiza la identificación de los puntos de eficiencia o ineficiencia del separador CIMCI con respecto a la separación de líquido. En la Figura N° 19, se presenta la eficiencia de separación de líquido en función del arrastre de líquido por la corriente de gas, en los distintos caudales de gas y de líquido alimentados.

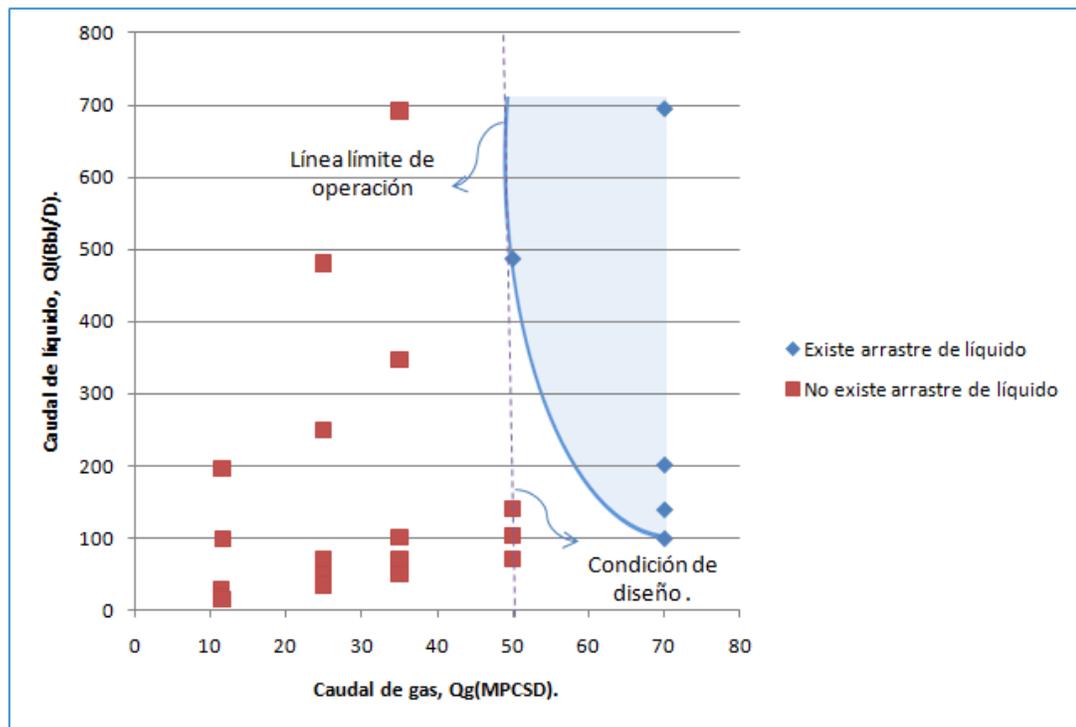


Figura N° 19: Eficiencia de separación de líquido en función del arrastre de líquido por la corriente de gas, en los distintos caudales de gas y de líquido alimentados.

En la gráfica anteriormente descrita se evidencia la eficiencia de separación de líquido en función de la presencia o ausencia del LCO, en donde se puede describir una línea límite de operación bajo la cual el separador trabaja eficientemente en cuanto a la separación de líquido. De igual manera se evidencia que el arrastre de líquido depende mayormente del caudal de gas con el que se trabaje ya que para iguales caudales de líquido, de 700, 500, 200, 140 y 100 BPD el LCO existe en el separador solo en caudales mayores de 50 MPCSD de gas de la matriz experimental, condición límite de diseño del separador.

De lo anterior se obtiene que:

- No se observa arrastre de líquido para caudales de gas aproximados de 10, 25 y 35 MPCSD, al igual que para caudales de 50 MPCSD con caudales de líquido menores a 140 BPD.

- Se observa arrastre de líquido para un caudal de gas aproximado de 50 MPCSD, con caudales de líquido aproximados de 500 BPD y con caudales de gas mayores a 50 MPCSD.

4.1.2 Determinación de la eficiencia de separación de Gas.

Como se mencionó anteriormente la eficiencia de separación de gas será determinada cuantitativamente mediante el arrastre de gas en la corriente de líquido que sale por el fondo del separador, o GVF obtenido a través del método del tubo lateral anteriormente mencionado, en el cual la fracción de líquido es capturada mediante válvulas de cierre rápido. En donde si se cuenta con un porcentaje de GVF mayor al 10% se clasificará en ese punto experimental al separador CIMCI de flujo ascendente como ineficiente en cuanto a la separación de gas, mientras que si la fracción de gas arrastrada por la corriente de líquido o GVF es menor al 10%, se clasificará en ese punto al separador como eficiente en cuanto a la separación de gas.

Esta fracción representa un parámetro importante dentro del proceso de separación, ya que indica la posibilidad de que se puedan realizar mediciones de líquido a la salida del separador sin que esta se vea afectada, debido a que los medidores de flujo tipo Coriolis típicamente pueden tolerar hasta un 10% de fracción de gas en la corriente de líquido.

En la **Figura N° 20**, se presenta la fracción de arrastre de gas en la corriente de líquido que sale por el fondo del separador.

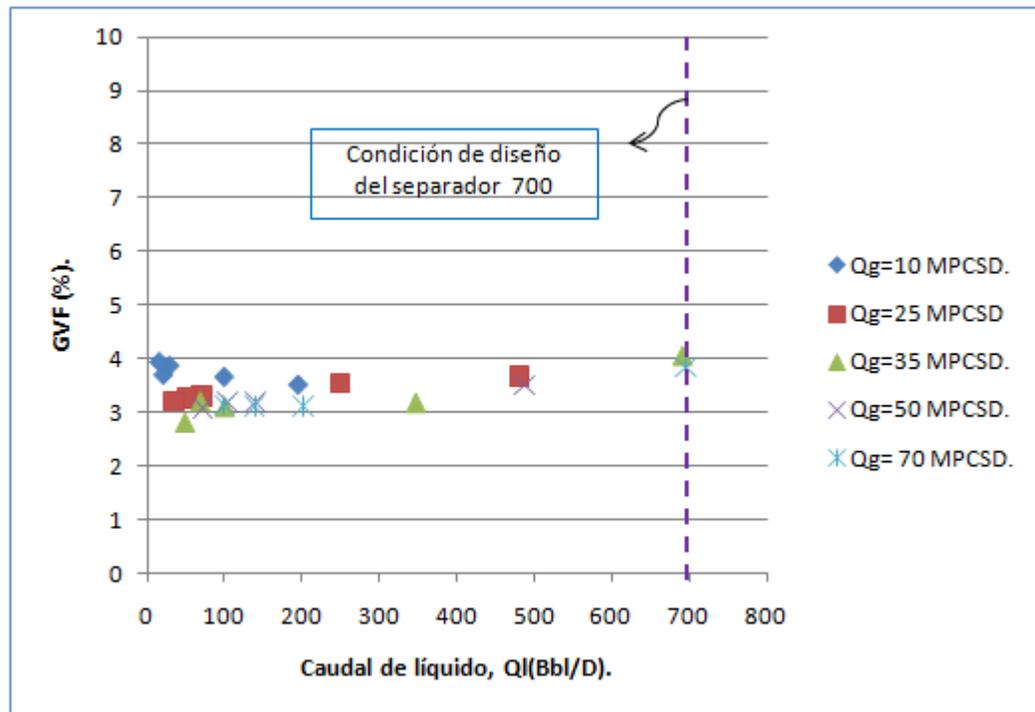


Figura N° 20: Fracción de arrastre de gas en la corriente de líquido que sale por el fondo del separador.

Como se evidencia en la figura anteriormente mostrada, la fracción de arrastre de gas en la corriente de líquido que sale por el fondo del separador es siempre inferior al 5% cuando se trabaja por debajo de un caudal de 700 BPD, condición de diseño del separador CIMCI de flujo ascendente.

Es importante destacar que el separador CIMCI de flujo ascendente brinda una eficiencia en cuanto a separación de gas en caudales mayores al 50 MPCSD, el cual es condición de diseño del separador, por lo que es eficiente trabajar con el separador para dichos caudales en cuanto a separación de gas.

Por lo que se puede deducir que el separador CIMCI de flujo ascendente, para los puntos experimentales trabajados resulta eficiente en cuanto a la separación de gas, ya que aunque se evidencie arrastre de gas, los valores del mismo están considerablemente por debajo del valor establecido como aceptable (<10%).

4.1.3. Determinación de los caudales de gas y de líquido eficientes.

Para la determinación de los caudales de líquido y gas que permitan obtener una eficiencia de separación adecuada dentro del separador CIMCI de flujo ascendente, se lleva a cabo el estudio de su comportamiento, es decir, si se presenta una fracción de arrastre de gas, GVF mayor al 10% o arrastre de líquido en los diferentes puntos experimentales de la matriz anteriormente mencionada, en función del caudal de líquido que será medido a través del medidor tipo Coriolis y del caudal de gas que será medido por una placa orificio.

Mediante este procedimiento se determinan los caudales de gas y líquido en los cuales el separador trabaja eficientemente. En la **Figura N° 21**, se evidencia de forma gráfica lo antes mencionado.

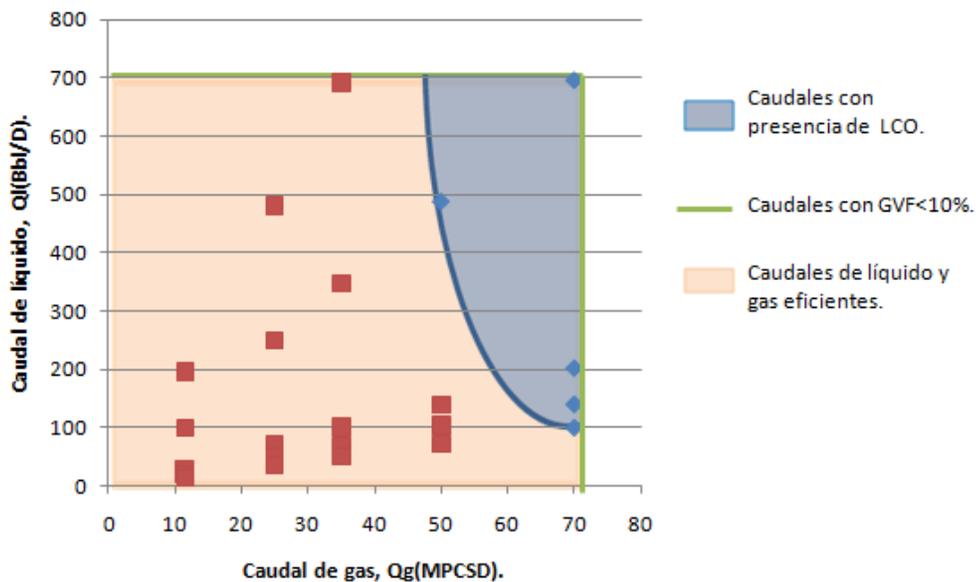


Figura N° 21: Caudales de gas y líquido que generen la mayor eficiencia de separación.

En la figura anteriormente mencionada se evidencia que los caudales de líquido y de gas que brindan la mayor eficiencia de separación son seleccionados en función de la ausencia de LCO principalmente, ya que como se mencionó anteriormente para todos los puntos experimentales se obtuvo una fracción de gas arrastrado por la corriente de

gas menor al 10%, por lo que se califica al separador como eficiente en cuanto a la separación de gas.

Es por ello que se obtienen los siguientes caudales experimentales de gas y líquido que generan la mayor eficiencia de separación de gas y líquido en el prototipo CIMCI de flujo ascendente. En la Tabla N° 6, se evidencian los puntos experimentales anteriormente descritos

Qg(MPCSD).	Ql(BPD).
10	200
10	100
10	28
10	20
10	14
25	500
25	250
25	71
25	50
25	35
35	700
35	350
35	100
35	70
35	50
50	142
50	100
50	71

Tabla N° 6: Caudales de gas y líquido que permiten obtener una eficiencia la mayor separación del prototipo de separación CIMCI de flujo ascendente.

Como se puede observar en la tabla anteriormente mencionada 18 puntos experimentales brindan una mayor eficiencia de separación, en cuanto a ausencia de LCO y una fracción de gas arrastrado por la corriente de líquido menor al 10%.

Lo que permite calificar como eficiente el desempeño del separador CIMCI de flujo ascendente para caudales de gas inferiores a 50 MPCSD y caudales de líquido inferiores a 700 BPD, bajo las condiciones de trabajo establecidas tanto de presión y

temperatura, así como la configuración de la tubería por la cual fluye la mezcla bifásica trabajada Gas-Líquido.

4.1.4. Determinación de la caída de presión dentro del separador CIMCI de flujo ascendente.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la caída de presión dentro del separador es medida en cada punto experimental a través del sensor transmisor de caída de presión DPT-0301, el cual registra valores de la diferencia de presión entre la entrada de la alimentación y la salida de gas del separador CIMCI de flujo ascendente. Esta misma es medida en pulgadas de agua y es transformada a unidades de lpc, para su posterior análisis.

De igual manera es necesario acotar que según Caliz y col. (2009) este valor de caída de presión deber estar en un rango de 1 a 5 lpc para este tipo de separadores multiciclónicos.

En la **Figura N° 22**, se evidencia la caída de presión en el separador CIMCI para cada punto de la matriz experimental, evaluada durante el proceso de separación con el flujo bifásico Gas-Líquido.

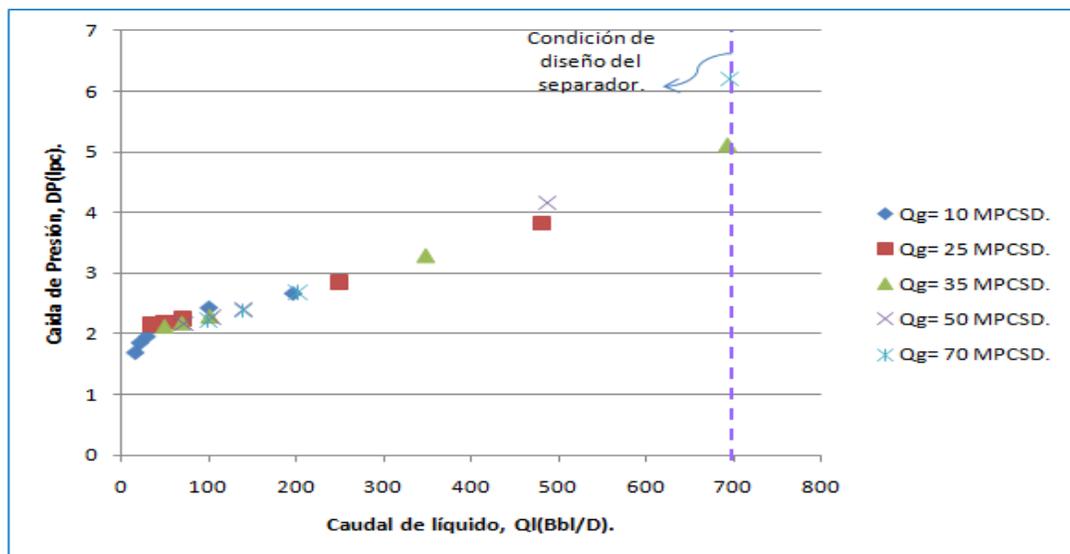


Figura N° 22: Caída de presión del separador CIMCI de flujo ascendente para toda la matriz experimental.

Como se puede observar en la figura expuesta anteriormente, la caída de presión en el separador CIMCI de flujo ascendente aumenta con el incremento del caudal de líquido para un mismo caudal de gas. Y a su vez, para los puntos experimentales trabajados se encontró entre 1 y 4 lpc para caudales de líquido menores al establecido en la condición de diseño de 700 BPD, dichos valores de presión se consideran aceptables, ya que se encuentran dentro del rango anteriormente mencionado de 1 y 5 lpc.

Mientras que para caudales de líquido evaluados en 700 BPD, se presentó una caída de presión dentro del separador mayor a 5 lpc, valores de presión que se encuentran fuera del rango de caída de presión establecido para separadores multiciclónicos.

Además se puede evidenciar que para un mismo caudal de gas al aumentar el caudal de líquido con el que se trabaje, la caída de presión del separador CIMCI de flujo ascendente también aumenta.

Por lo que resulta más eficiente para este proceso de separación establecido con condiciones de presión, temperatura y configuración de tubería trabajar puntos experimentales de caudales de líquido menores a 700 BPD.

4.1.5. Determinación de la fuerza centrífuga y flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.

4.1.5.1. Fuerza Centrífuga

La fuerza centrífuga se determina para cada punto experimental de la matriz, una vez observado el comportamiento del separador. Se calcula la fuerza centrífuga de los puntos experimentales a la entrada del separador CIMCI de flujo ascendente mediante la ecuación 11 anteriormente mencionada en el Capítulo II.

Es importante señalar que se enfocarán los valores de fuerza G convenientes en cuanto a la presencia o ausencia de LCO, ya que como se discutió anteriormente para todos los puntos de la matriz experimental el separador CIMCI de flujo ascendente es eficiente en cuanto a separación de gas.

En la **Figura N° 23**, se presentan los valores de Fuerza G, en función del parámetro adimensional G.

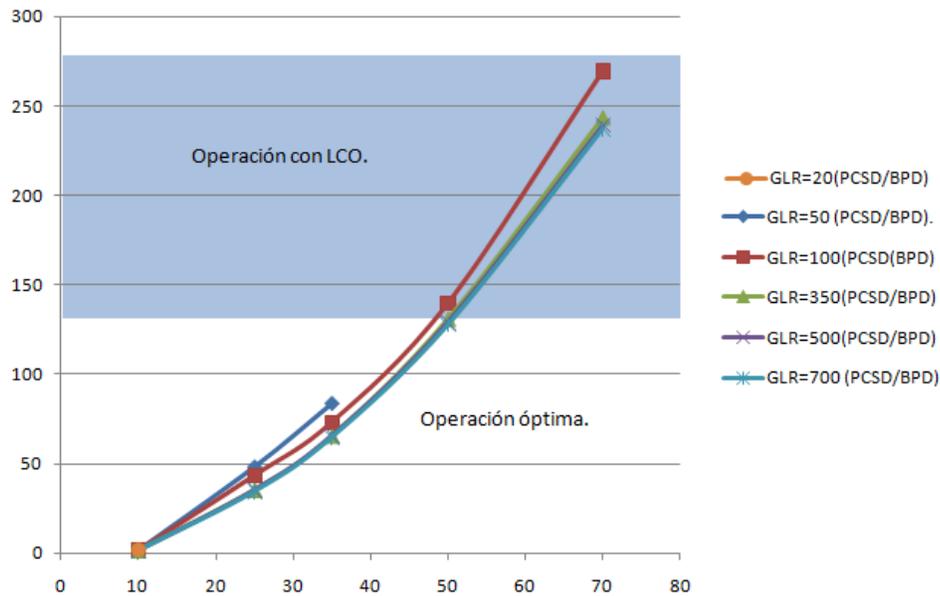


Figura N° 23: Valores de fuerza G, que generan la mayor eficiencia de separación.

En la figura anterior se evidencia que para valores aproximados entre 7 y 130 G se alcanza una eficiencia de separación satisfactoria, sin la presencia de arrastre de líquido por la corriente de gas LCO. Aunque el rango recomendado por la teoría para los separadores de cilindros ciclónicos Gas-Líquido GLCC esta entre 56 y 100 G, se puede evidenciar que en la práctica los separadores multiciclónicos poseen un rango mayor de Fuerza G, para los cuales brindan una eficiencia de separación aceptable.

Mientras que cuando se tienen valores de G mayores a 130 y hasta 270 se evidencia arrastre de líquido por la corriente de gas que sale por el tope del separador, lo que califica al separador como ineficiente en cuanto a separación de líquido, afectando de manera directa el desempeño del separador.

4.1.5.2. Flujo de cantidad de movimiento por unidad de área.

El flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada, es determinado mediante la ecuación 13 mencionada anteriormente en el capítulo anterior, según Chin (2002) en función de la densidad de la mezcla y de la velocidad de la mezcla.

A continuación en la **Figura N° 24**, se presentan los valores de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área de los diferentes puntos experimentales a la entrada del separador.

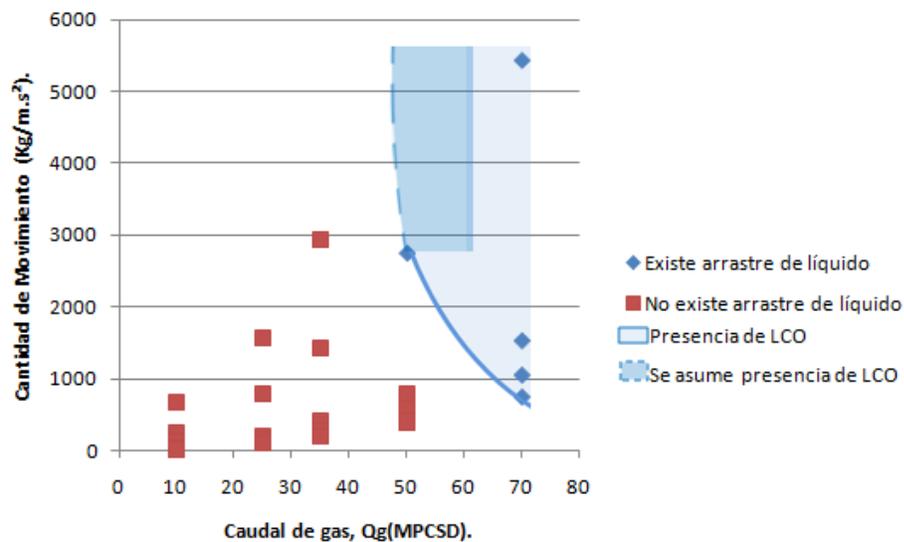


Figura N° 24: Flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada de separador para todos los puntos experimentales.

Como se observa en la figura anterior para un caudal menor de 50 MPCSD no se observa arrastre de líquido por la corriente de gas que sale por el tope del separador para valores de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área comprendidos entre 17 y 3000 $Kg/m.s^2$.

Mientras que para una caudal de 50 MPCSD, condición de diseño del separador CIMCI de flujo ascendente, se presenta arrastre para un valor de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área de 2800 $Kg/m.s^2$, suponiéndose que para mayores valores de flujo de cantidad de movimiento se tendrá la presencia de arrastre de

líquido, por lo que se hace conveniente trabajar con un valor inferior a este cuando este en la zona límite de diseño del separador.

A su vez para un caudal aproximado de 70 MPCSD se presenta arrastre desde un valor de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área mayor a 750 Kg/m.s^2 , por lo que para esta configuración de tubería y condiciones de diseño del separador no se hace eficiente trabajar con este caudal en ningún valor de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador.

4.1.6. Patrones de flujo en la entrada del separador CIMCI.

Para la evaluación de los puntos experimentales estudiados en el Trabajo Especial de Grado se utilizó el mapa de patrón de flujo propuesto por Taitel y Dukler, obtenido a través de un programa en Excel el cual requiere información básica de densidad, viscosidad y tensión superficial entre las fases, así como adicionalmente rugosidad, ángulo de inclinación y diámetro de la tubería de entrada al separador CIMCI de flujo ascendente.

En la **Figura N° 25**, se evidencian el patrón de flujo de cada punto experimental obtenido a través del mapa de patrón de flujo de Taitel y Dukler.

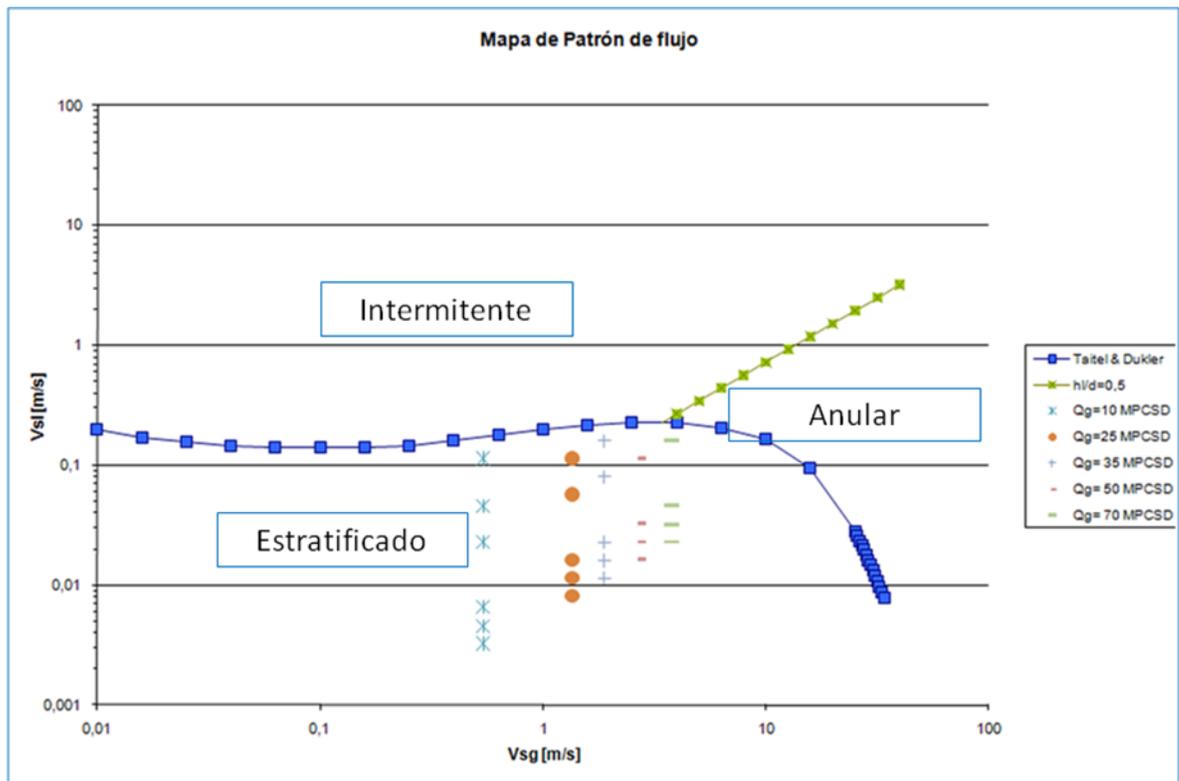


Figura N° 25: Mapa de patrón de flujo de los puntos experimentales según Taitel y Dukler.

Como se puede evidenciar en la figura anteriormente descrita los puntos experimentales según la velocidad superficial de líquido y gas de toda la matriz experimental se encuentran en el patrón de flujo estratificado en la entrada del separador para todos los caudales de gas y líquido trabajados.

Mientras que en las pruebas experimentales se evidenciaron e identificaron cada uno de los patrones de flujo en la entrada del separador CIMCI, a través de la tubería de plexiglás. A continuación se evidencian algunas imágenes de los patrones de flujo observados en la entrada.



Figura N° 26: Patrones de flujo observados en la entrada del separador CIMCI.

En la **Figura N° 27**, que se muestra a continuación se evidencian cada uno de los patrones de flujo reales de la mezcla bifásica en la entrada del separador CIMCI observado durante la realización de las pruebas experimentales.

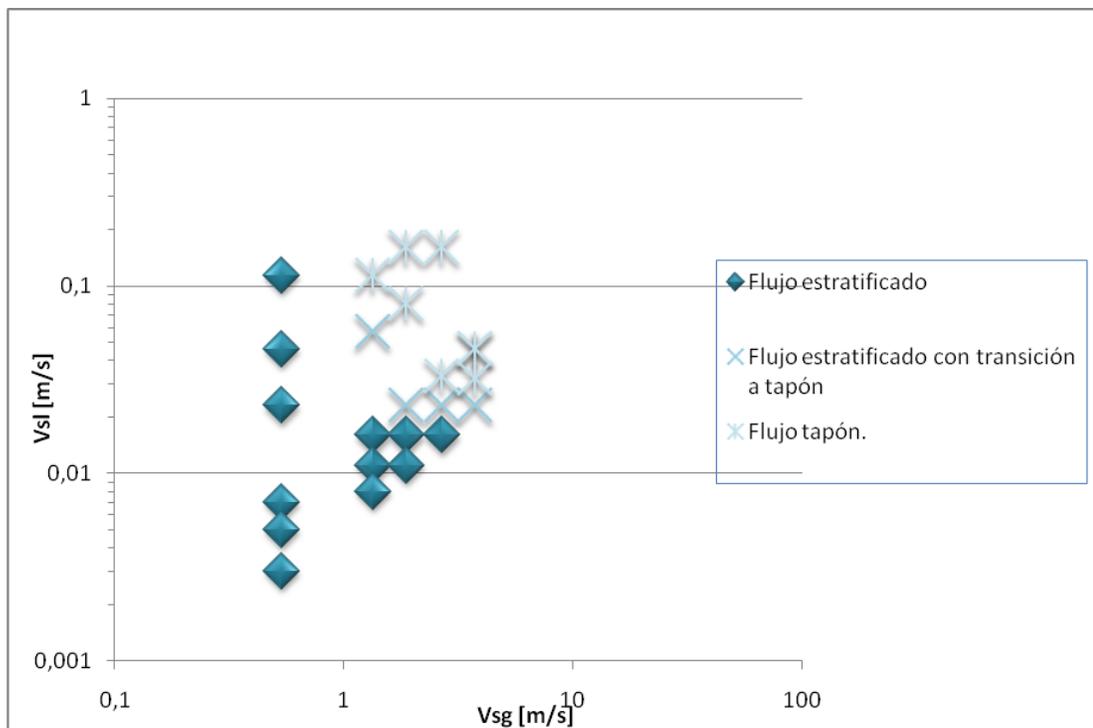


Figura N° 27: Patrones de flujo reales de los puntos experimentales.

Como se puede observar en la figura anterior, los patrones de flujo experimentales no coinciden totalmente con los obtenidos a través del mapa de patrón de flujo de Taitel y Dukler, ya que la configuración de la tubería que se tiene en el sistema de

separación tiene diferentes ángulos de inclinación que modifican o promueven patrones de flujo diferentes. Aunque el patrón de flujo que más se presentó en las pruebas experimentales fue el estratificado.

Para los puntos experimentales con las velocidades superficiales anteriormente mencionadas de flujo estratificado ondulado, el flujo bifásico de entrada se encuentra separado en sus fases gas y líquido casi totalmente por efectos de la gravedad, se divide en los dos ciclones internos a través del difusor, y entra de manera tangencial al separador, específicamente a la región central, donde ocurre la separación de las fases básicamente por el efecto centrífugo, en donde asciende de manera espiral a través de los ciclones, el gas fluye por la parte central y el líquido se dirige hacia las paredes internas de los cilindros y sale del cilindro por un espacio anular generado entre el cuerpo del ciclón y la salida de gas o *vortex finder* y es drenada hacia la zona de burbujas del separador, esta fase líquida arrastra pequeñas burbujas de gas, que ascienden en un corto tiempo a la región central nuevamente. Mientras sale a través de los *vortex finder* donde es recolectado y pasa a la región de gotas arrastra esta corriente de gas que no se separaron en la región central y salpican las paredes de la región de gotas, cuando esas pequeñas gotas chocan se vuelven más grandes y descienden nuevamente a la región central. En la figura que se muestra a continuación se evidencia el comportamiento del separador CIMCI de flujo ascendente con la presencia de este patrón de flujo en la alimentación.

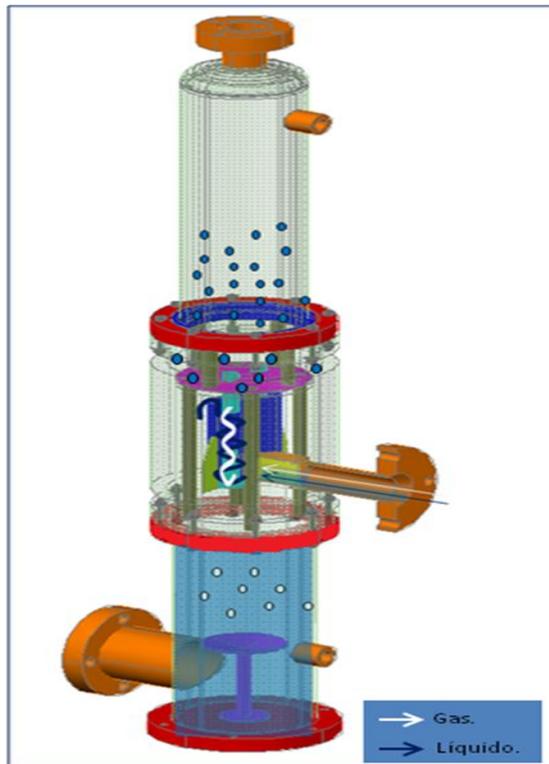


Figura N° 28: Comportamiento del separador CIMCI para una alimentación con patrón de flujo estratificado.

Para los puntos experimentales de flujo estratificado con transición a tapón, en el patrón de flujo estratificado ocurre lo anteriormente mencionado en el proceso de separación del equipo CIMCI de flujo ascendente, sin embargo, cuando se presenta el flujo tapón en un cierto intervalo de tiempo (los tapones no son sucesivos) el flujo dentro de la mezcla bifásica dentro de los ciclones en la región central no desarrolla la trayectoria espiral correcta, no tiene el suficiente tiempo para que las dos fases se separen eficientemente, el líquido desciende hacia la región de burbujas arrastrando una mayor cantidad de aire y el gas haciendo a través de los *vortex finder* formando una especie de fuente al llegar a la región de gotas y empapa las paredes de esta región.

En la **Figura N° 29**, se evidencia el recorrido de la alimentación en la región central de separador.

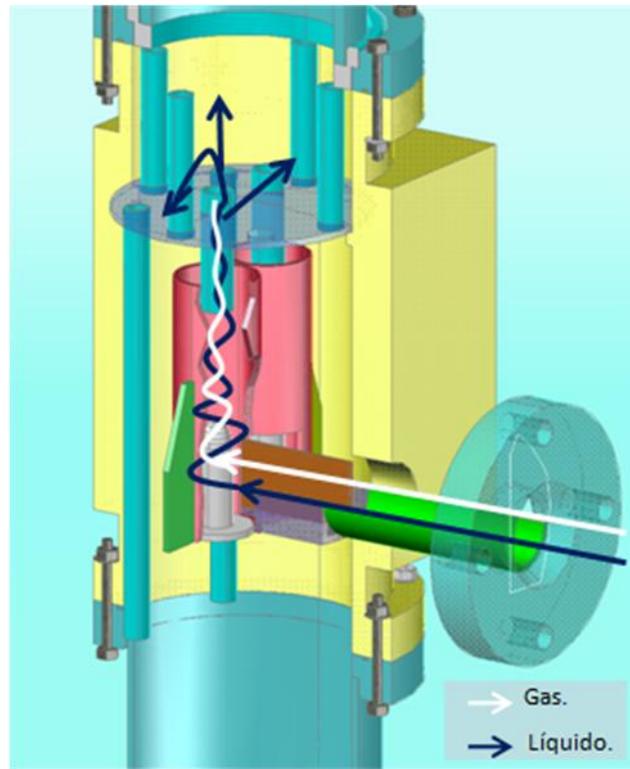


Figura N° 29: Región central del separador con una alimentación de patrón de flujo estratificado con presencia de tapón.

Mientras que en los puntos experimentales de flujo tapón, son tapones repetitivos de menor intensidad que tienen el mismo comportamiento que describe la figura anteriormente mostrada, se arrastran mayores burbujas de gas hacia la región de burbuja y se forma la pequeña fuente de líquido en la región de gotas donde se llenan de gotas las paredes de esta región. En dichos puntos experimentales se empapa toda la pared de la región de gotas y se crea un remolino de líquido en la parte superior, con la presencia de estos tapones se puede evidenciar la presencia de líquido en la trampa de líquido, la alimentación tiene el mismo comportamiento que se representa en la figura anterior solo que el líquido forma una cascada de mayor nivel en la región de gotas y son arrastradas mayores burbujas de gas a la región de burbuja del separador. En la **Figura N° 30**, que se muestra a continuación se describe lo anteriormente mencionado.

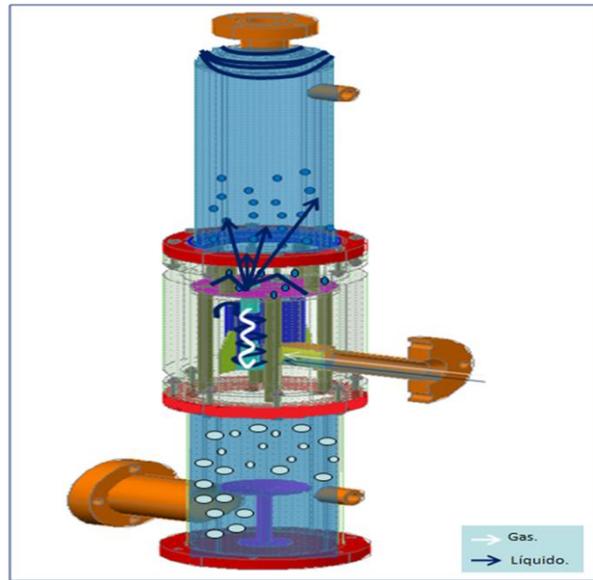


Figura N° 30: Comportamiento del separador con presencia de arrastre de líquido con flujo tapón.

En la figura que se muestra a continuación se evidencia la trampa de líquido en presencia del arrastre de líquido.



Figura N° 31: Trampa de líquido en presencia de arrastre de líquido.

CONCLUSIONES.

Luego del desarrollo de todas las pruebas experimentales y en función de los objetivos planteados en este Trabajo Especial de Grado se obtienen las siguientes conclusiones:

- Existe la presencia de arrastre de líquido por la corriente de gas que sale del separador en el límite de gas de la ventana de operación para la cual fue diseñado el equipo de separación CIMCI de flujo ascendente (50 MPCSD).
- No se observa arrastre de líquido para caudales de gas aproximados de 10, 25 y 35 MPCSD, al igual que para caudales de 50 MPCSD con caudales de líquido menores a 140 BPD.
- Se observa arrastre de líquido para un caudal de gas aproximado de 50 MPCSD, con caudales de líquido aproximados de 500 BPD y con caudales de gas por encima de 50 MPCSD.
- La fracción de arrastre de gas en la corriente de líquido que sale por el fondo del separador es siempre inferior al 5% cuando se trabaja por debajo de un caudal de 700 BPD, condición de diseño del separador CIMCI de flujo ascendente.
- Los caudales de gas y líquido de mayor eficiencia están comprendidos por caudales de gas inferiores a 50 MPCSD y caudales de líquido inferiores a 700 BPD, bajo las condiciones de trabajo establecidas tanto de presión y temperatura, así como la configuración de la tubería por la cual fluye la mezcla bifásica trabajada Gas-Líquido.
- La caída de presión en el separador CIMCI de flujo ascendente aumenta con el incremento del caudal de líquido para un mismo caudal de gas.
- La caída de presión experimental con caudales de líquido menores a 700 BPD se encuentran en el rango recomendado de caída de presión para los

separadores ciclónicos, mientras que la caída de presión experimental para caudales de 700 BPD, se encuentran fuera del rango recomendado (1 a 5 lpc).

- Para valores de fuerza G dentro del separador CIMCI de flujo ascendente entre 7 y 130 G se alcanza una eficiencia de separación, sin la presencia de arrastre de líquido por la corriente de gas LCO, presentando un rango de G, mayor al recomendado para los GLCC (56 y 100 G).
- Para caudales menores de 50 MPCSD con un flujo de cantidad de movimiento por unidad de área comprendido entre 17 y 3000 Kg/m.s² al igual que para caudales de gas aproximado de 50 MPCSD y un flujo de cantidad de movimiento por unidad de área menor a 2800 Kg/m.s² , no existe arrastre de gas.
- Para esta configuración de tubería y condiciones de diseño del separador no es eficiente trabajar con un caudal de gas de 700 BPD para ningún valor de flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador ya que existe arrastre de líquido por la corriente de gas.
- Los patrones de flujo experimentales no coinciden totalmente con los obtenidos a través del mapa de patrón de flujo de Taitel y Dukler, debido a la configuración de la tubería del circuito de separación que modifica el patrón de flujo que se debería observar en la entrada del separador CIMCI de flujo ascendente.
- El patrón de flujo observado experimentalmente en la mayoría de las pruebas es el estratificado ondulado.
- Los tapones de mayor intensidad son los asociados a los caudales de 50 MPCSD con un caudal de líquido de 500 BPD y 70 MPCSD en los cuales existe el arrastre de líquido por la corriente de gas que sale del separador.

RECOMENDACIONES.

Durante el desempeño de las pruebas experimentales y según las diferentes observaciones realizadas, se evidenciaron distintos factores que influyen de manera negativa en el desempeño del separador CIMCI de flujo ascendente. Para estos factores se tienen las siguientes recomendaciones:

Patrón de flujo en la entrada del separador.

Como se evidenció anteriormente la presencia del flujo tapón desfavorece el desempeño del separador, este factor contribuye al aumento de la caída de presión en el separador CIMCI, aumenta el roce y crea vibraciones que comprometen la integridad mecánica de la estructura del separador. Por esas razones anteriormente mencionadas se recomienda que se trabaje la alimentación de manera que entre al separador en flujo estratificado, realizando adecuaciones a la tubería colocando un ángulo de inclinación y una tubería más larga que rompa el patrón de flujo y estratifique la alimentación.

Rediseñar la matriz experimental.

Es necesario establecer nuevos puntos experimentales de estudio dentro de la matriz para poder establecer con mayor precisión los cambios de patrones de flujo en base a los caudales, como los puntos específicos de gas y de líquido en los cuales se presenta el arrastre de líquido dentro del separador CIMCI para las condiciones de operación establecida.

Modificación del cálculo de flujo de la cantidad de movimiento por unidad de área.

Como se evidenció el flujo de la cantidad de movimiento por unidad de área se calculó en base a la velocidad de la mezcla, tratada como la suma de las velocidades superficiales de las fases. Para un estudio posterior y una mayor precisión y establecimiento de este factor, se recomienda que se trabaje el flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en función de la velocidad real de cada fase gas y

líquido, en función de la fracción de líquido que se encuentre en la tubería dependiendo del patrón de flujo que se presente. Para dicha modificación son necesarias distintas simulaciones y aproximaciones para cada patrón de flujo dentro de la tubería, de manera de poder realizar las mejores aproximaciones y obtener resultados más precisos de este factor utilizado en el diseño de los separadores.

Análisis en base a velocidades superficiales.

Como se explico anteriormente el estudio en base a las velocidades superficiales es ampliamente manejado en el diseño y estudio de separadores, es por ello que para próximos estudios de investigación se recomienda expresar los términos de arrastre de líquido, arrastre de gas, fuerza centrífuga y flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en función de las velocidades superficiales de líquido y gas de cada uno de los puntos experimentales de la matriz de manera de realizar un análisis de mayor alcance.

Nuevos parámetro de Análisis.

Para estudios posteriores se recomienda el análisis del Reynolds, número de Froude, parámetros de mecánica de fluidos para garantizar un análisis más amplio sobre el desempeño del separador en cuanto a los fluidos de interés que se estén trabajando.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbuceanu, N. y Scott S. (2001). **“Novel intel desing expense range of operability for Compact Separator”**. SPE Paper 71555.
- Beggs, D. y Brill, J. (1998). **“Two-phase flow in pipes”**. Sexta edición.
- Brito, A. (1999). **“Estudio del comportamiento de separadores tipo ciclónico y dinámico en sistemas de alta viscosidad”**. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Brito, A.; Lombano, G.; Figueredo, J.; Cabello, R.; Pinedo, T.; López, J.; Trujillo, J. (2007). **Diseño e Instalación de separadores ciclónico y multiciclónico para ser evaluados con mezclas aire-agua en el circuito de separación Norte 6**. Informe técnico INT-11517. Intevep.
- Brito, A., Trujillo, J., López, J. y Blanco W. (2009). **“Base se Diseño de un Separador Ciclónico de Múltiples Cilindros de Flujo Ascendente”**. Informe técnico INT-12904, 2009. Intevep.
- Brown K. y Beggs H. (1978) **“Two Phase Fluid Flow In Horizontal Pipes”**. Disponible en: <http://www.pe.utexas.edu/2phaseweb/Colorhor.jpg> [Consultada: Agosto 2010].
- Caliz, L., Valdez, J., Brito, A., Cabello, R., López, J. y Trujillo, M. **“Evaluación de los separadores ciclónicos CYCINT y ciclones múltiples con un sistema agua/aire en el laboratorio de flujo multifásico Norte 6”**. Informe Técnico INT-12687, 2009. Intevep.
- Chien K. H., Chen T. T., Pei B. y Lin W. K. (1197). **“Void Fraction measurement by using the side-tube method”**. Department of Nuclear Engineering Physics, National Tsing-Hua University, Hsin-Chu, Taiwan.
- Chin R. W.(2002). **“Increasing Separation Capacity with New and Proven Technologies”**. SPE paper 77495.

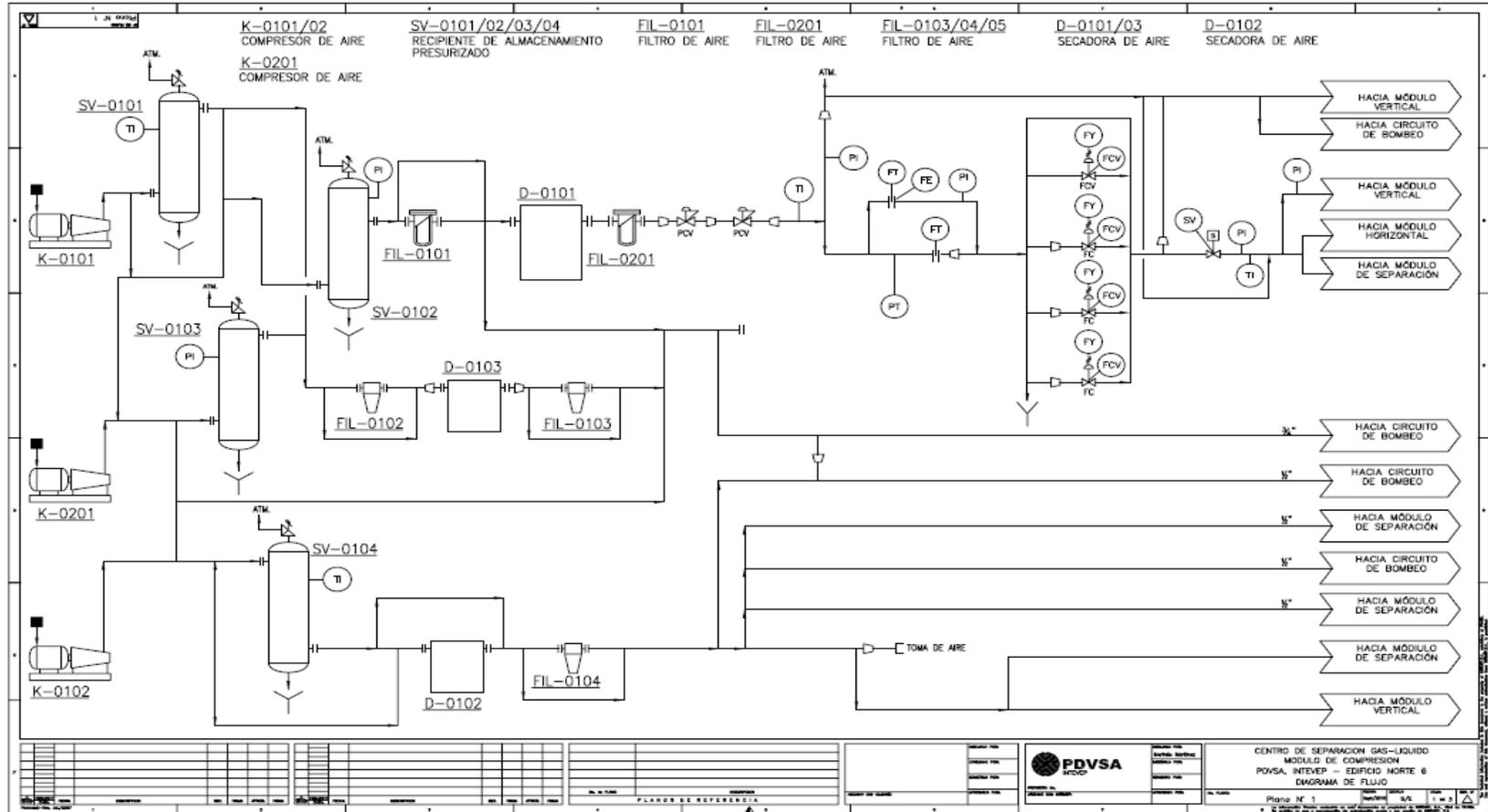
- Chirinos, W. A. (1998). **“Liquid Carry-over in Gas-liquid Cylindrical Cyclone Separator”**. Department of Petroleum and Mechanical Engineering Separation Technology, Banff, Canada, pp 43-60.
- Cooper C. D. y Callejón F.C. (2010). **Tipo de Ciclones**. Disponible en: <http://www.galeon.com/palmaceite/Ciclones.doc>. [Consultada: Mayo 2010].
- Corradini M. (1997). **“Flow Patterns and Flow-pattern transitions”**. Disponible en: <http://wins.engr.wisc.edu/teaching/mpfBook/node10.html> [Consultada: Julio 2010].
- Diquima (2008). **Separadores Ciclónicos**. Disponible en: <http://www.diquima.upm.es/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/CICLONES/Links6.htm> . [Consultada: Julio 2010].
- García F. y Haoulo M. (2009). **“Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Aire-Agua en Tuberías Horizontales y Ligeramente Inclinas”**. Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v20n3/art02.pdf> [Consultada: Julio 2010]. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Gómez, E., Strefeza, M. y Cañete, M. (2005). **“Desarrollo del sistema de control y software de un sistema de medición multifásico basado en la técnica del separador ciclónico”**. Disponible en: <http://www.ps.usb.ve/cac05/trabajos/cac05-41.pdf>. [Consultada: Julio 2010].
- Hamana, A. y col. (2000). **“Estudio y comportamiento de separadores tipo ciclónico y dinámico con sistema aceite-aire”**. CIT, PDVSA-Intevep, INT-08067,2000.
- Hoffman, A. y Stein, L. (2002). **Gas Cyclones and Swirl Tubes, Principles, Design and Operation**. Springer – Velarg: Berlin. 11-12 p.

- Matson, J. (2008). **“Evaluación del Desempeño de dos Prototipos de separadores Ciclónicos Gas-Líquido”**. Tesis Pregrado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Méndez B., (2002). **“Optimización Geométrica de Separadores Gas-Líquido Tipo Ciclón”**. Tesis MSc. Universidad Simón Bolívar. Decanato de Estudios de Postgrado. Sarteneja.
- Omaña M. (2005). **“Estado del Arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores líquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas”**. Disponible en: <http://repositorios.unimet.edu.ve/docs/31/ATTP155O53P4.pdf>. Tesis de Pregrado. Universidad Metropolitana. Caracas. [Consultada: Julio 2010].
- Pérez, C. (2010). **Plan Siembra Petrolera**. Disponible en: http://www.soberania.org/Articulos/articulo_1995.htm [Consultada: Mayo 2010].
- Shoham, O. (2000). **Two phase flow modeling**. Trabajo de Grado. The University of Tulsa, Department of Petroleum Engineering, USA.
- Sister V. y Ovchinnikov Yu. (1993). **“Hydrodynamics of a multicyclone separator with helical static vortex generators”**. Chemical and Petroleum Engineering. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/h4012w8w41276167/> . [Consultada: Agosto 2010].
- Spurgeon, R. y Flood, M. (2009). **Producción Petrolera**. Disponible en: <http://www.rena.edu.ve/primeretaapa/Geografia/produccion.html> [Consultada: Mayo 2010].
- Svarovsky, L. (1984). **Hydrocyclones**. Technomic: Lancaster, Pennsylvania. 1-5p.

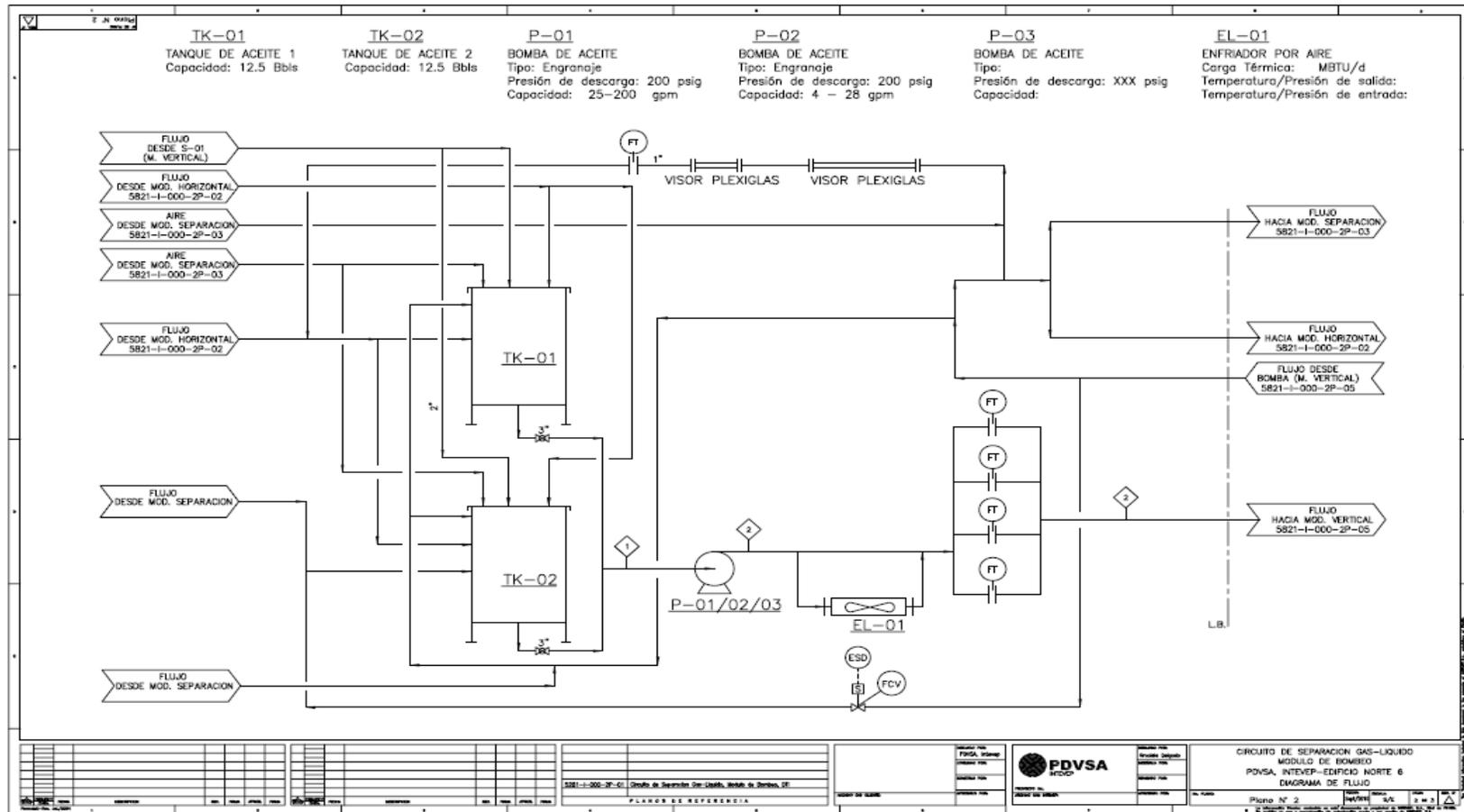
- Taitel, Y. y Dukler A. (1976). **A model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal gas – liquid flow.** AIChE Journal, Vol.22 (1), 47-54.
- Valdez, J., Caliz, L., Brito, A., Cabello, R., López, J. y Trujillo, M. **“Evaluación de los separadores ciclónicos CYCINT y ciclones múltiples con un sistema aceite/aire en el laboratorio de flujo multifásico Norte 6”.** Informe Técnico INT-12688, 2009. Intevep.

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de Tubería e instrumentación del Módulo de Compresión



Anexo 2: Diagrama de Tubería e instrumentación del Módulo de Bombeo



Anexo 4: Procedimiento de arranque de planta en el circuito de separación gas líquido

Como paso inicial para la realización de las pruebas experimentales en el circuito de separación gas líquido, se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Alinear las válvulas correspondientes al circuito de separación con el separador CIMCI.
2. Verificar que el nivel de líquido dentro de los tanques de alimentación sea el adecuado.
3. Seleccionar la bomba a utilizar según el caudal de líquido que se maneje.
4. Encender el variador de frecuencia de la bomba a utilizar y manualmente colocar los valores establecidos de dicha bomba en el variador.
5. Encender la computadora de la sala de control y cargar el programa de separación LabVIEW.
6. Encender la fuente de alimentación de los instrumentos.
7. Seleccionar en el panel de control, la válvula de inyección de gas a utilizar, igualmente en la pantalla del LabVIEW el diámetro de orificio de la placa.
8. Seleccionar válvula de control de presión de aire a la salida del separador, dependiendo del diámetro de la placa orificio a trabajar en la salida de gas del separador.
9. Seleccionar la bomba a utilizar en el panel de control e igualmente en la pantalla del LabVIEW, dependiendo de la cantidad de flujo de líquido a trabajar.

Anexo 5: Procedimiento de operación del circuito de separación gas líquido

Una vez que se han alineado todos los equipos, encendido todos los instrumentos se procede a buscar los puntos de la matriz de prueba, tal y como se describe a continuación:

1. Aumentar manualmente de una manera muy cuidadosa el porcentaje de salida en el controlador Bailey para la inyección de gas hasta alcanzar el caudal correspondiente a la prueba a realizar.
2. Monitorear constantemente la presión dentro del separador CIMCI y regular mediante el control de presión del separador el porcentaje con el fin de que esta presión sea la requerida y evitar accidentes dentro de la planta.
3. Aumentar manualmente el porcentaje de salida en el controlador Bailey para la inyección de líquido hasta alcanzar el flujo de líquido requerido.
4. Colocar el controlador de nivel dentro del separador en automático y una vez que el nivel llegue o alcance el valor deseado colocarlo en automático.
5. Al incrementar el caudal de líquido y gas dentro del sistema verificar el valor de la presión y el nivel dentro del separador, ya que la acción antes mencionada perturba el trabajo de los controladores.
6. Ajustar K_p y K_i para cada incremento del caudal de líquido y gas.
7. Seguidamente una vez que se logran las condiciones esperadas, dar un tiempo para que el sistema se estabilice y se pueda proceder a grabar los datos de la prueba experimental en formato xls, filmar video de cada prueba y escribir todo los detalles relevantes en el cuaderno de laboratorio.
8. Continuamente capturar Hold up, grabar los datos de las señales lentas en formato xls y finalmente pesar el líquido recolectado, se repite cada captura de Hold up por lo menos tres veces.

Anexo 6: Procedimiento de parada del circuito de separación gas líquido

Una vez culminadas las pruebas experimentales se procede de la siguiente manera para realizar la parada de planta:

1. Disminuir el flujo de gas manualmente, hasta que el porcentaje de salida de la válvula de control sea igual a cero.

2. Disminuir manualmente el flujo de líquido que pasa a través de la bomba.
3. Apagar la bomba, haciendo un clic sobre su icono en la pantalla de LabVIEW 5.1.
4. Desactivar el variador de frecuencia.
5. Apagar compresores y secadores siguiendo instrucciones establecidas por el fabricante.
6. Cerrar en forma secuencial, todas las válvulas abiertas en las actividades de arranque de la línea de inyección de gas y de la línea de inyección de líquido.

Anexo 7: Fotos del separador CIMCI de flujo ascendente.



Figura N° 32: Separador CIMCI de flujo ascendente en el Circuito de separación de Norte 6.



Figura N° 33: Región central del separador CIMCI de flujo ascendente.



Figura N° 34: Región de gotas del separador CIMCI de flujo ascendente.

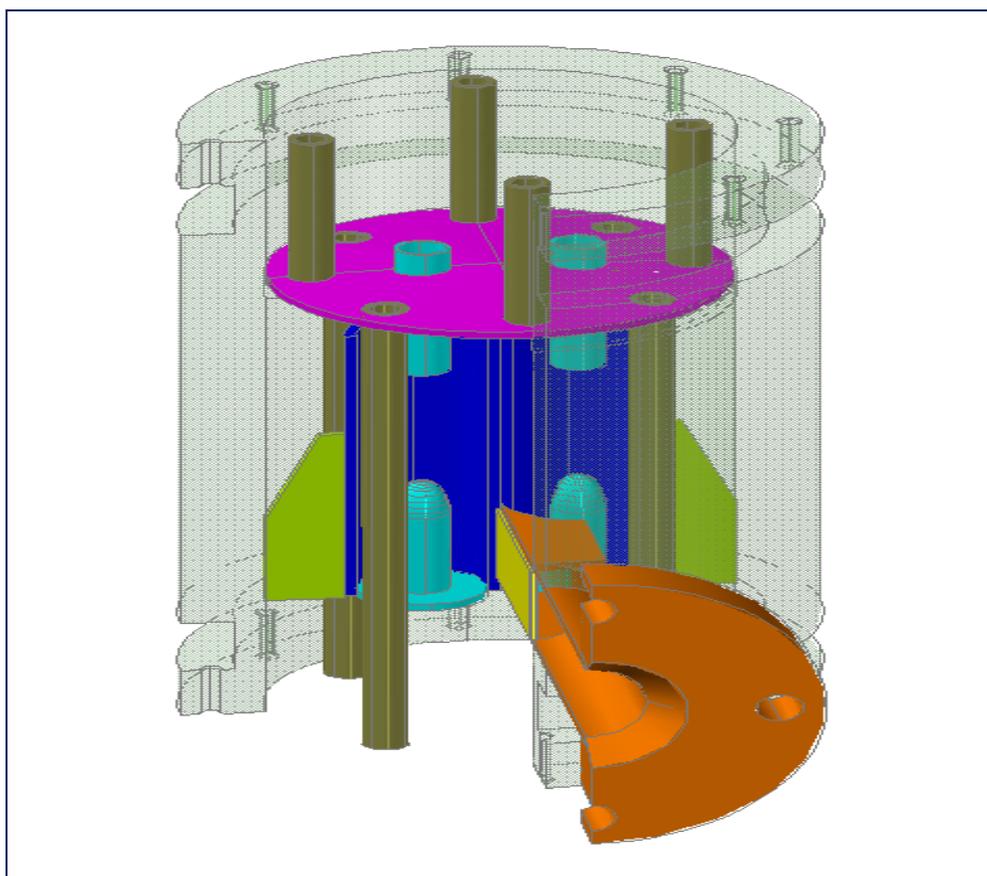


Figura N° 35: Acercamiento de la entrada tangencial de la alimentación a los ciclones.

Anexo 8: Tablas de resultados.

N° de Prueba	Ql	Qg	Qg(PCD).	Qg(m3/D)	Ql(m3/D).	Qg(m3/s)	Ql(m3/s).	Vmr(m/s).	G(Ad)
6087_S2_B_001	466,287	12125,349	15249,647	457,489	74,606	0,005	0,001	1,760	10,537
6087_S2_B_002	195,810	11563,205	14542,658	436,280	31,330	0,005	0,000	1,451	7,162
6087_S2_B_003	99,357	11604,879	14595,069	437,852	15,897	0,005	0,000	1,368	6,361
6087_S2_B_004	28,132	11419,293	14361,664	430,850	4,501	0,005	0,000	1,282	5,591
6087_S2_B_005	20,090	11430,800	14376,136	431,284	3,214	0,005	0,000	1,276	5,538
6087_S2_B_006	14,762	11586,791	14572,321	437,170	2,362	0,005	0,000	1,288	5,645
6087_S2_B_100% Aire	14,214	11540,618	14514,251	435,428	2,274	0,005	0,000	1,283	5,596
6087_S2_B_008	480,295	30249,911	38044,305	1141,329	76,847	0,013	0,001	3,767	48,266
6087_S2_B_009	249,043	30358,475	38180,842	1145,425	39,847	0,013	0,000	3,568	43,292
6087_S2_B_010	70,638	28675,485	36064,202	1081,926	11,302	0,013	0,000	3,219	35,255
6087_S2_B_011	50,481	28803,623	36225,357	1086,761	8,077	0,013	0,000	3,215	35,160
6087_S2_B_012	34,853	28609,761	35981,542	1079,446	5,576	0,012	0,000	3,180	34,386
6087_S2_B_100% Aire	8,146	28833,533	36262,974	1087,889	1,303	0,013	0,000	3,180	34,391

Tabla N° 7: Valores de las diferentes variables medidas relacionadas con el cálculo de Fuerza G.

N° de Prueba	Ql	Qg	Qg(PCD).	Qg(m3/D)	Ql(m3/D).	Qg(m3/s)	Ql(m3/s).	Vmr(m/s).	G(Ad)
6087_S2_B_014	692,228	39329,228	49463,060	1483,892	110,756	0,017	0,001	4,960	83,663
6087_S2_B_015	347,897	39238,381	49348,804	1480,464	55,664	0,017	0,001	4,635	73,070
6087_S2_B_016	101,173	38981,196	49025,350	1470,761	16,188	0,017	0,000	4,381	65,289
6087_S2_B_017	69,549	39323,037	49455,273	1483,658	11,128	0,017	0,000	4,390	65,549
6087_S2_B_018	49,893	39221,940	49328,127	1479,844	7,983	0,017	0,000	4,361	64,684
6087_S2_B_100% Aire	8,212	39313,002	49442,652	1483,280	1,314	0,017	0,000	4,333	63,854
6087_S2_B_021	487,434	54168,032	68125,329	2043,760	77,989	0,024	0,001	6,405	139,538
6087_S2_B_022	139,801	55209,900	69435,651	2083,070	22,368	0,024	0,000	6,202	130,833
6087_S2_B_023	103,878	55150,361	69360,770	2080,823	16,620	0,024	0,000	6,163	129,177
6087_S2_B_024	71,199	55081,534	69274,210	2078,226	11,392	0,024	0,000	6,125	127,613
6087_S2_B_100% Aire	13,447	54177,586	68137,344	2044,120	2,152	0,024	0,000	5,973	121,349
6087_S2_B_027	695,449	75097,936	94448,171	2833,445	111,272	0,033	0,001	8,898	269,289
6087_S2_B_028	201,557	75196,352	94571,946	2837,158	32,249	0,033	0,000	8,457	243,290
6087_S2_B_029	139,446	75071,640	94415,100	2832,453	22,311	0,033	0,000	8,387	239,253
6087_S2_B_030	99,282	75085,474	94432,498	2832,975	15,885	0,033	0,000	8,352	237,250
6087_S2_B_100% Aire	11,026	76466,764	96169,701	2885,091	1,764	0,033	0,000	8,423	241,320

Tabla N°7: Valores de las diferentes variables medidas relacionadas con el cálculo de Fuerza G.

N° de Prueba	Ql(B PD)	Qg(MP CSD).	Qg(PC SD).	Qg1(P CD)	Qg(m 3D)	Qg(m3s)	Ql(m 3D)	Ql(m 3s)	HL (Adimension al).	HL (%)	ρ_l (K g/l).	ρ_l (Kg/ m3).	ρ_m (Kg/ m3).	Vsl(m/s).	Vsg(m/s).	Vm(m/s).	Cantidad de Movimiento (Kg/ms2)
6087_S2_B_001	466,287	12125,349	12,125	15249,647	457,489	0,005	74,606	0,001	0,140	14,021	0,992	992,158	140,143	0,305	1,873	2,17813	664,87355
6087_S2_B_002	195,810	11563,205	11,563	14542,658	436,280	0,005	31,330	0,000	0,067	6,700	0,992	992,336	68,352	0,128	1,786	1,91415	250,44096
6087_S2_B_003	99,357	11604,879	11,605	14595,069	437,852	0,005	15,897	0,000	0,035	3,504	0,991	991,249	34,786	0,065	1,792	1,85742	120,01315
6087_S2_B_004	28,132	11419,293	11,419	14361,664	430,850	0,005	4,501	0,000	0,010	1,034	0,992	992,376	10,263	0,018	1,764	1,78211	32,59497
6087_S2_B_005	20,090	11430,800	11,431	14376,136	431,284	0,005	3,214	0,000	0,007	0,740	0,992	992,444	7,342	0,013	1,765	1,77862	23,22587
6087_S2_B_006	14,762	11586,791	11,587	14572,321	437,170	0,005	2,362	0,000	0,005	0,537	0,992	992,409	5,333	0,010	1,790	1,79922	17,26314
6087_S2_B_100% Aire	14,214	11540,618	11,541	14514,251	435,428	0,005	2,274	0,000	0,005	0,520	0,991	990,617	5,147	0,009	1,782	1,79173	16,52386
6087_S2_B_008	480,295	30249,911	30,250	38044,305	1141,329	0,013	76,847	0,001	0,063	6,308	0,995	995,021	62,770	0,315	4,672	4,98659	1560,83745
6087_S2_B_009	249,043	30358,475	30,358	38180,842	1145,425	0,013	39,847	0,000	0,034	3,362	0,995	994,910	33,447	0,163	4,689	4,85190	787,38061
6087_S2_B_010	70,638	28675,485	28,675	36064,202	1081,926	0,013	11,302	0,000	0,010	1,034	0,993	992,532	10,261	0,046	4,429	4,47512	205,49531
6087_S2_B_011	50,481	28803,623	28,804	36225,357	1086,761	0,013	8,077	0,000	0,007	0,738	0,993	992,657	7,323	0,033	4,449	4,48171	147,09171
6087_S2_B_012	34,853	28609,761	28,610	35981,542	1079,446	0,012	5,576	0,000	0,005	0,514	0,992	992,343	5,100	0,023	4,419	4,44153	100,61073
6087_S2_B_100% Aire	8,146	28833,533	28,834	36262,974	1087,889	0,013	1,303	0,000	0,001	0,120	0,995	994,700	1,190	0,005	4,453	4,45860	23,66071

Tabla N° 8: Valores y cálculos referidos al flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.

N° de Prueba	Ql(B PD)	Qg(MP CSD).	Qg(PC SD).	Qg1(PC CD)	Qg(m 3D)	Qg(m3s)	Ql(m 3D)	Ql(m 3s)	HL (Adimension al).	HL (%)	ρ_l (Kg/l).	ρ_l (Kg/m3).	ρ_m (Kg/m3).	Vsl(m/s).	Vsg(m/s).	Vm(m/s).	Cantidad de Movimiento (Kg/ms2)
6087_S2_B_014	692,28	39329,228	39,329	49463,060	1483,892	0,017	110,756	0,001	0,069	6,946	0,991	991,173	68,842	0,453	6,074	6,52768	2933,39957
6087_S2_B_015	347,897	39238,381	39,238	49348,804	1480,464	0,017	55,664	0,001	0,036	3,624	0,991	991,014	35,911	0,228	6,060	6,28813	1419,92574
6087_S2_B_016	101,173	38981,196	38,981	49025,350	1470,761	0,017	16,188	0,000	0,011	1,089	0,991	990,914	10,788	0,066	6,021	6,08681	399,67261
6087_S2_B_017	69,549	39323,037	39,323	49455,273	1483,658	0,017	11,128	0,000	0,007	0,744	0,991	990,910	7,377	0,046	6,073	6,11889	276,19413
6087_S2_B_018	49,893	39221,940	39,222	49328,127	1479,844	0,017	7,983	0,000	0,005	0,537	0,991	990,887	5,317	0,033	6,058	6,09041	197,20968
6087_S2_B_100% Aire	8,212	39313,002	39,313	49442,652	1483,280	0,017	1,314	0,000	0,001	0,089	0,992	992,160	0,878	0,005	6,072	6,07717	32,43157
6087_S2_B_021	487,434	54168,032	54,168	68125,329	2043,760	0,024	77,989	0,001	0,037	3,676	0,994	993,580	36,521	0,319	8,366	8,68536	2754,99086
6087_S2_B_022	139,801	55209,900	55,210	69435,651	2083,070	0,024	22,368	0,000	0,011	1,062	0,992	992,346	10,543	0,092	8,527	8,61859	783,11074
6087_S2_B_023	103,878	55150,361	55,150	69360,770	2080,823	0,024	16,620	0,000	0,008	0,792	0,992	992,307	7,863	0,068	8,518	8,58587	579,65087
6087_S2_B_024	71,199	55081,534	55,082	69274,210	2078,226	0,024	11,392	0,000	0,005	0,545	0,992	992,300	5,410	0,047	8,507	8,55383	395,81400
6087_S2_B_100% Aire	13,447	54177,586	54,178	68137,344	2044,120	0,024	2,152	0,000	0,001	0,105	0,994	993,529	1,045	0,009	8,368	8,37640	73,29577
6087_S2_B_027	695,449	75097,936	75,098	94448,171	2833,445	0,033	111,272	0,001	0,038	3,779	0,991	990,980	37,446	0,455	11,599	12,05417	5441,03558
6087_S2_B_028	201,557	75196,352	75,196	94571,946	2837,158	0,033	32,249	0,000	0,011	1,124	0,991	991,107	11,139	0,132	11,614	11,74589	1536,80059
6087_S2_B_029	139,446	75071,640	75,072	94415,100	2832,453	0,033	22,311	0,000	0,008	0,782	0,991	991,082	7,746	0,091	11,595	11,68595	1057,77686
6087_S2_B_030	99,282	75085,474	75,085	94432,498	2832,975	0,033	15,885	0,000	0,006	0,558	0,991	991,073	5,526	0,065	11,597	11,66178	751,54847
6087_S2_B_100% Aire	11,026	76466,764	76,467	96169,701	2885,091	0,033	1,764	0,000	0,001	0,061	0,993	992,578	0,607	0,007	11,810	11,81732	84,70263

Tabla N° 9: Valores y cálculos referidos al flujo de cantidad de movimiento por unidad de área en la entrada del separador CIMCI.

N° de Prueba.	Hold Up A	Hold Up B	Hold Up C	Hold Up D	Hold Up E	Hold Up F	Promedio (gr).	Promedio (Kg).	Densidad del agua (Kg/L).	Volumen (L).	Volumen (cm³).	Longitud de Agua (cm).	GVF (%).
6087_S2_B_001.	983,5	977,5	985,2	980,2			981,6	0,9816	0,992158336	0,98935 821	989,358 2143	44,24172386	2,61561 994
6087_S2_B_002.	973,1	971,4	973,2				972,566 6667	0,97256 6667	0,992335514	0,98007 846	980,078 4644	43,82675573	3,52904 308
6087_S2_B_003.	970,4	970,8	969				970,066 6667	0,97006 6667	0,991248988	0,97863 068	978,630 6759	43,7620141	3,67155 161
6087_S2_B_004.	967,8	969,5	970,1				969,133 3333	0,96913 3333	0,992376472	0,97657 831	976,578 3052	43,67023701	3,87357 031
6087_S2_B_005.	972	969,1	971,5				970,866 6667	0,97086 6667	0,992444349	0,97825 804	978,258 043	43,74535085	3,70823 057
6087_S2_B_006.	963,7	974,6	967,5	968,1			968,475	0,96847 5	0,992409139	0,97588 279	975,882 7907	43,63913527	3,94203 109
6087_S2_B_008.	975,6	970,5	975,3				973,8	0,9738	0,995020601	0,97867 32	978,673 2041	43,76391586	3,66736 549
6087_S2_B_009.	976,3	973,8	974,4				974,833 3333	0,97483 3333	0,994910296	0,97982 033	979,820 3288	43,81521252	3,55445 186
6087_S2_B_010.	975,5	975,6	974				975,033 3333	0,97503 3333	0,992532192	0,98236 948	982,369 4796	43,92920442	3,30353 417
6087_S2_B_011.	976,1	974,3	976,3				975,566 6667	0,97556 6667	0,992656509	0,98278 373	982,783 7299	43,9477287	3,26275 874
6087_S2_B_012.	975	975,2	977				975,733 3333	0,97573 3333	0,992342911	0,98326 226	983,262 2597	43,96912741	3,21565 616
6087_S2_B_014.	973,7	964,7	960,2	966,3			966,225	0,96622 5	0,991173284	0,97482 954	974,829 5435	43,59203659	4,04570 419

Tabla N° 10: Cálculos referidos al arrastre de gas por la corriente de líquido.

N° de Prueba.	Hold Up A	Hold Up B	Hold Up C	Hold Up D	Hold Up E	Hold Up F	Promedio (gr.)	Promedio (Kg.)	Densidad del agua (Kg/L).	Volumen (L.)	Volumen (cm³).	Longitud de Agua (cm).	GVF (%).
6087_S2_B_015.	975,6	974,5	974,4				974,833 3333	0,97483 3333	0,991013863	0,9836 7275	983,672 7512	43,9874836	3,1752 5071
6087_S2_B_016.	975,6	975,5	975,4				975,5	0,9755	0,99	0,9844 4485	984,444 8517	44,02201008	3,0992 5141
6087_S2_B_017.	974,5	974,3	974,7				974,5	0,9745	0,99091	0,9834 3946	983,439 4647	43,97705159	3,1982 1353
6087_S2_B_018.	975,4	976	988	974,1			978,375	0,97837 5	0,990887209	0,9873 7272	987,372 7214	44,15293738	2,8110 5572
6087_S2_B_021.	974,2	974,2	973,9	974,1			974,1	0,9741	0,993579741	0,9803 9439	980,394 3861	43,84088299	3,4979 4632
6087_S2_B_022.	976	976,1	976,4				976,166 6667	0,97616 6667	0,992582729	0,9834 6127	983,461 2654	43,97802647	3,1960 6765
6087_S2_B_023.	976,2	976,1	976,3				976,2	0,9762	0,992580342	0,9834 9721	983,497 2127	43,97963394	3,1925 2929
6087_S2_B_024.	976,3	976,1	976,3				976,233 3333	0,97623 3333	0,991400954	0,9847 0082	984,700 8213	44,03345643	3,0740 5585
6087_S2_B_027.	971	969,5	965	966,8			968,075	0,96807 5	0,990980028	0,9768 8649	976,886 489	43,68401825	3,8432 3519
6087_S2_B_028.	980	974,2	974,9	974,2	974,4	972,7	975,54	0,97554	0,991107237	0,9842 9309	984,293 0855	44,01522346	3,1141 9004
6087_S2_B_029.	976,1	974,3	976				975,466 6667	0,97546 6667	0,991081722	0,9842 4443	984,244 4319	44,01304779	3,1189 7911
6087_S2_B_030.	973	976,2	975,1	976,4			975,175	0,97517 5	0,991072673	0,9839 5912	983,959 1244	44,00028952	3,1470 6246

Tabla N°10: Cálculos referidos al arrastre de gas por la corriente de líquido.

Anexo 9: Cálculos Tipo.

- Cálculo de conversión del caudal de gas estándar a caudal de gas real.

$$Qg_2 = \frac{P_1 \cdot Qg_1 \cdot T_2}{P_2 \cdot T_1}$$

$$Qg_2 = \frac{14,7 \text{ psia} \cdot 11586,79 \text{ PCSD} \cdot 77^\circ\text{F}}{15 \text{ psia} \cdot 60^\circ\text{F}} = 14572,321 \text{ PCD.}$$

- Cálculo de la fracción de líquido en la tubería (Hold Up de líquido).

$$HL = \frac{Ql}{Ql + Qg}$$

$$HL = \frac{2,73 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2,73 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} + 5,06 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- Cálculo de la densidad de la mezcla.

$$\rho_m = \rho_l \cdot HL + \rho_g (1 - HL)$$

$$\rho_m = 992,409 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 1,199 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} (1 - 5 \cdot 10^{-3}) = 5,333 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

- Cálculo de la velocidad superficial del líquido.

$$V_{sl} = \frac{Ql}{A}$$

$$V_{sl} = \frac{2,73 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2,827 \cdot 10^{-3} \text{m}^2} = 0,01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Cálculo de la velocidad superficial del gas.

$$V_{S_g} = \frac{Q_g}{A}$$

$$V_{S_l} = \frac{5,06 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{2,827 \cdot 10^{-3} m^2} = 1,790 \frac{m}{s}$$

- Cálculo de la velocidad superficial de la mezcla.

$$V_{S_m} = V_{S_l} + V_{S_g}$$

$$V_{S_m} = 0,01 \frac{m}{s} + 1,790 \frac{m}{s} = 1,8 \frac{m}{s}$$

- Cálculo del flujo de cantidad de movimiento por unidad de área.

$$M = \rho_m \cdot V_m^2$$

$$M = 5,333 \frac{Kg}{m^3} \cdot \left(1,8 \frac{m}{s}\right)^2 = 17,263 \frac{Kg}{m \cdot s^2}$$

- Cálculo de la constante K para el componente radial de la velocidad de la mezcla.

$$k = 0,02826 \cdot \left(\frac{zT}{P}\right)$$

$$k = 0,02826 \cdot \left(\frac{1 \cdot 536,67^\circ R}{15 \text{ psig} + 14,7}\right) = 0,5106$$

- Cálculo de la componente radial de la velocidad de la mezcla.

$$V_{mr} = \left(\frac{Q_l + k \cdot Q_g}{A_{Ent}} \right) \times \cos \alpha$$

$$V_{mr} = \left(\frac{2,73 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} + 0,5106 \cdot 5,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{0,002026 \text{ m}^2} \right) \times \cos(0) = 1,288 \text{ m/s.}$$

- Cálculo de Fuerza G.

$$G = \frac{V_{mr}^2}{g \cdot r_{SEP}}$$

$$G = \frac{(1,288 \text{ m/s})^2}{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 0,03 \text{ m}} = 5,645.$$

- Cálculo del promedio de la masa de agua en el tubo lateral.

$$m_{prom} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{n}$$

$$m_{prom} = \frac{963,7 \text{ gr} + 974,6 \text{ gr} + 967,5 \text{ gr} + 968,1 \text{ gr}}{4} = 968,5 \text{ gr} = 0,9685 \text{ Kg}$$

- Cálculo del volumen de agua en el tubo lateral.

$$V_{H_2O} = \frac{m_{prom}}{\rho_i}$$

$$V_{H_2O} = \frac{0,9685 \text{ Kg}}{0,9924 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}} = 0,975 \text{ L} = 975,88 \text{ cm}^3$$

- Cálculo de la altura puntual del líquido para cada medición de Hold up en la en el tubo lateral

$$L_{H2O} = \frac{4 * V_{H2O}}{\pi * D_3^2}$$

$$L_{H2O} = \frac{4 * 975,88 \text{ cm}^3}{\pi * (5,336 \text{ cm})^2} = 43,64 \text{ cm}$$

Cálculo de la altura puntual de gas para cada medición de Hold up en el tubo lateral.

$$\%GVF = \frac{L_g}{L_g + L_{H2O}} \cdot 100$$

$$\%GVF = \frac{L_g}{L_g + L_{H2O}} \cdot 100 = 3,94\%$$