

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA CHANDLER PVT 3000 PARA ESTUDIOS PVT Y CARACTERIZACIÓN TERMODINÁMICA DE FLUIDOS DE YACIMIENTOS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. García L. Wilxiung L.,  
Santander C. Neyilson D.  
Para optar al Título de  
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2020

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA CHANDLER PVT 3000 PARA ESTUDIOS PVT Y CARACTERIZACIÓN TERMODINÁMICA DE FLUIDOS DE YACIMIENTOS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. René Rojas.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Jonathan López.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs. García L. Wilxiung L.,  
Santander C. Neyilson D.  
Para optar al Título de  
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2020

Caracas, Septiembre de 2020

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Wilxiung L. García L. y Neyilson D. Santander C., titulado:

**“PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA CHANDLER PVT 3000 PARA ESTUDIOS PVT Y CARACTERIZACIÓN TERMODINÁMICA DE FLUIDOS DE YACIMIENTOS”**

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

---

Ing. Miguel Castillejo  
Jurado

---

Ing. Sandro Gasbarri  
Jurado

---

Lic. René Roberto Rojas  
Tutor



**Escuela de Ingeniería de Petróleo  
Facultad de Ingeniería-UCV**

## ACTA

Quienes suscriben, integrantes de la totalidad del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado, titulado: “**PUESTA A PUNTO DEL EQUIPO CHANDLER PVT 3000 PARA ESTUDIOS PVT Y CARACTERIZACION TERMODINAMICA DE FLUIDOS DE YACIMIENTOS**”, presentado por los Bachilleres WILXIUNG LAZTLIEN GARCIA LEDEZMA y NEYILSON DAVID SANTANDER CANDIALES, titulares de la Cédula de Identidad No. 18.220.675 y 16.875.303. Para optar al título de Ingeniero de Petróleo, acordaron por unanimidad solicitarles a las autoridades correspondientes de la Facultad de Ingeniería, tengan a bien otorgar **MENCIÓN HONORÍFICA** al Trabajo de Grado antes mencionado.

Esta solicitud se hace con base a la originalidad del enfoque utilizado para tratar el tema presentado y a la excelencia, tanto de su contenido como de su presentación formal, atributos que lo convierten en una fuente de referencia útil.

Se levanta la presente Acta en Caracas, a los veinte cuatro (24) días del mes de septiembre del año dos mil veinte.

Prof. Sandro Gasbarri  
Jurado Principal



Prof. Miguel Castillo  
Jurado Principal

Prof. Rene Rojas  
Tutor Académico

## **DEDICATORIA**

*A mi Mamá Nayibe, por ser mi guía, mi fortaleza, mi ejemplo a seguir y la persona más maravillosa de este mundo, te amo*

**Neyilson Santander**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios primeramente por su infinito amor y misericordia, su nobleza y perdón alimentan mi espíritu con la sabiduría necesaria para aprender de mis errores y ser una mejor persona cada día.

A mi mamá, por su apoyo incondicional durante esta y todas las etapas de mi vida, por enseñarme que la nobleza que abriga el corazón nos define como seres humanos y no un título profesional o algún bien material. Sin ti este logro no hubiera sido posible.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por brindarme la oportunidad de absorber conocimientos en sus prestigiosas aulas.

A mis tutores, René Rojas y Jonathan López, por su inconmensurable aporte en el desarrollo de la investigación, por compartir su conocimiento y experiencia.

A Jorge Giménez y José Gregorio Hernández “Goyo” quienes con su humildad, paciencia y conocimiento me ayudaron a crecer a nivel profesional.

A Wilxiung García, mi compañera de tesis, quien compartió conmigo este camino en las buenas, excelentes y en las malas.

A los profesores que nos apoyaron incondicionalmente, Miguel Castillejo, Simón González, Adriana Zambrano y Jesús León quienes fueron una guía en este proceso.

**Neyilson Santander**

## DEDICATORIA

*A mi Dios todo poderoso por darme la vida por permitirme crecer con la familia que tengo, por permitirme haber aprendido los principios y fundamentos para ser la persona que hoy en día soy; por colocar en mi camino personas maravillosas de luces; quienes me han apoyado y han creído en mí, impulsándome a continuar, dándome aliento y fuerza para lograr mis metas.*

*A Alexis García Muñoz y Milagros Josefina Ledezma de García (mis padres) les dedico este logro por ser los dos seres que me han apoyado incondicionalmente a lo largo de toda mi vida*

*Dedico este trabajo especial de grado a mi ángel guardián que me cuida desde el cielo mi tía Juanita; donde quieras que estés sé que estarás contenta por mi logro; gracias a ti “mi Juani Juani” por haberme apoyado incondicionalmente desde que nací ; hoy “la orquídea de oro” como me decías, brillo de felicidad logrando mis metas.*

*Dedico esta tesis orgullosamente a mi querido y recordado profesor Carlos Gil, quien en vida dedicó sus conocimientos a la investigación y estudios en el área de análisis de PVT; hoy su alumna con honor, mérito y gloria “mi profe” donde quiera que este congratulo con este trabajo especial de grado al pionero de los análisis PVT del laboratorio de PVT de la UCV; hoy sus alumnos le damos continuidad a este gran proyecto que por destino de la vida no pudiste concluir apreciado profesor. “Con mucho cariño de una cachorrita investigadora a un extraordinario y gran goloso investigador del universo PVT.*

*Dedico esta tesis a mi majestuosa e ilustre escuela de petróleo con todo mi corazón por haberme forjado en su seno.*

*Wilziung Laztlien García Ledezma.*

## AGRADECIMIENTO

Gracias a mi Dios por permitirme primeramente desarrollarme en el maravilloso núcleo familiar que tengo; por darme salud; por adquirir y asimilar conocimientos; por iluminar de bendiciones mi camino cada día.

Gracias a mis padres: Milagros Josefina Ledezma de García y Alexis García Muñoz por haberme dado la vida, haberme inculcado valores y principios, por creer siempre en mí, por haberme apoyado infinitamente en toda mi vida.

Gracias a mis hermanas: Wilchuang y Wilkleng y a mis hermanos: Juan Carlos y Wildring por todo el apoyo incondicional que he recibido de todos ustedes los amo.

Gracias a ti David (compañero de tesis), por haber compartido esta inolvidable experiencia conmigo; por haber creído en mí, por cada alegría experimentada ante cada progreso de nuestro trabajo especial de grado, por ser mi complemento y apoyo.

Gracias a mi Tutor académico profesor Rene Rojas (mi señor tutor 1) por su apoyo incondicional. Como estudiante es un verdadero honor y privilegio no solo tenerlo como tutor, si no haber trabajado directamente en conjunto con usted, aprender de sus experiencias a nivel de laboratorio, gracias por su profesionalismo, por ser un gran académico sin su apoyo no sería posible este logro mil gracias mi querido y apreciado “profe”.

Gracias a mi tutor industrial Jonathan López por su apoyo incondicional, por su nivel de profesionalismo, por todos los conocimientos aportados, sin duda alguna sin ti nada de esto sería posible; mil gracias (mi señor tutor 2).

Gracias al profesor Miguel Castillejo (mi malvado); por su apoyo incondicional en todo momento, por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo este magnífico proyecto; por haber creído en mí; por haber hecho de mis pasantías días armoniosos; por haberme enseñado que con estudios, disciplina y dedicación se es posible lograr cualquier meta; por permitirme conocer el extraordinario ser humano que es.

Gracias a José Gregorio Hernández (mi gollito), por su apoyo incondicional, por creer en mí, por cada palabra de aliento, por ser el extraordinario ser humano que eres, por tu humildad, por tan importantes conocimientos aportados, porque me siento

orgullosa que nuestra industria petrolera cuente con excelente personal calificado como tú, por creer en el futuro del país (los estudiantes).

Gracias a Jorge Jiménez, por todos los conocimientos aportados, por su apoyo incondicional, por creer en mí, por cada palabra de aliento a continuar, por su excelente profesionalismo.

Gracias A mi profesor Simón González (mi paisanito), por todo el apoyo, por todos los conocimientos aportados.

Gracias a mi compañera y hermana de carrera incondicional María Catillo, por su apoyo incondicional, por cada consejo, por cada palabra de aliento a continuar a lograr mis metas, por todo el cariño hacia mi persona de tu familia, gracias a tu mama Moraima una persona extraordinaria por creer en mí y su apoyo incondicional.

Gracias a mi hermano de carrera Jesús León (mi académico) por haberme apoyado cada día en mis pasantías largas y estar siempre cuando lo he necesitado, por guiarme para lograr esta importantísima meta de mi vida.

Gracias a mis compañeros y hermanos de carrera: Dioneibis Herrera, Juan Mencia y Mario Herrera, los llevo siempre en mi corazón donde vaya y este.

Gracias a: Dimar Díaz y Audys Bolívar, por todo el apoyo que me han dado, por darme fuerzas para continuar durante toda mi carrera.

Gracias a mi apreciada profesora Adriana Zambrano por todo su apoyo, por creer en los estudiantes e incentivar a impulsar la investigación en nuestra escuela.

A mi amiga y compañera de estudios Andry Martínez por impulsarme a continuar, por cada consejo y buenos deseos.

Gracias a PDVSA, INTEVEP por toda la importantísima capacitación aportada.

***Gracias a mi alma mater, por darme las alas de los conocimientos, por haberme hecho experimentar el mágico orgullo que siento como venezolana de ser una UCEVISTA.***

A todos ellos Gracias.

*Wilsiung Laztlien García Ledezma*

García L., Wilxiung L. y Santander C., Neyilson D.

## **PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA CHANDLER PVT 3000 PARA ESTUDIOS PVT Y CARACTERIZACIÓN TERMODINÁMICA DE FLUIDOS DE YACIMIENTOS.**

**Tutor Académico: Prof. René R. Rojas. Tutor industrial: Ing. Jonathan López.  
Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de  
Petróleo. Año 2020, 340 p.**

**Palabras clave:** Estudios PVT, Análisis PVT, Sistema Chandler PVT 3000, Yacimiento de Gas Condensado

**RESUMEN.** Los estudios PVT constituyen una etapa de gran importancia en el desarrollo de los campos de petróleo y gas. Consisten en simular en el laboratorio los procesos de agotamiento del yacimiento, que ocurren como consecuencia de la producción de hidrocarburos. El progreso de estas pruebas, bajo condiciones controladas, permite en última instancia caracterizar el fluido del yacimiento. Desde luego, el uso de instrumentos de medición eficientes tiene un impacto considerable en la confiabilidad de la data PVT obtenida en el laboratorio. Por tal motivo, esta investigación tiene como propósito realizar puesta a punto del sistema Chandler PVT 3000 del fabricante Chandler Engineering, para mediciones experimentales de presión, volumen, y temperatura mediante la ejecución de pruebas convencionales en muestras de gas condensado. Para el alcance del objetivo que persigue esta investigación se estableció una metodología de diseño experimental, y de tipo descriptiva. En ese mismo contexto, se instaló, se reacondicionó, se calibró los componentes del sistema automático y se ejecutó pruebas PVT básicas, consistentes en liberación instantánea, expansión a composición constante (CCE) y agotamiento a volumen constante (CVD); de las cuales se obtuvieron resultados satisfactorios. De la misma manera, se comprobó la consistencia de los resultados de la prueba CVD mediante la aplicación del criterio de validación de Hoffman y el método de balance molar. En el caso de la prueba CCE, se aplicó una extensión de la función Y, la cual es utilizada frecuentemente para validar la data de este ensayo en muestras de petróleo negro. La modificación implementada, denominada función  $Y_{EXT}$  permitió comprobar la consistencia de las mediciones experimentales del punto de rocío. Por otra parte, los parámetros experimentales (Proc, °API, RGL,  $\beta_g$ ) fueron contrastados con los estimados por el uso del simulador composicional PVTsim, considerando un nivel de aceptación de error macro de 25% en la sumatoria de los cuatro parámetros PVT estudiados. Los resultados obtenidos permitieron concluir que para la muestra de gas condensado analizada la ecuación de estado que mejor cotejó los parámetros estudiados fue la ecuación PR-78. En virtud de los resultados alcanzados en esta investigación, se hace necesario destacar que el sistema Chandler PVT 3000 se encuentra en óptimas condiciones para la ejecución de pruebas PVT convencionales en muestras de yacimientos de gas condensado.

García L., Wilxiung L. y Santander C., Neyilson D.

**FINE-TUNING OF CHANDLER PVT 3000 SYSTEM FOR PVT STUDIES AND THERMODYNAMIC CHARACTERIZATION OF RESERVOIR FLUIDS.**

**Academic Advisor: Prof. René R. Rojas. Industrial Advisor: Ing. Jonathan López. Thesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Year 2020, 340 p.**

**Key words:** PVT Studies, PVT Analysis, Chandler PVT 3000 System, Gas Condensate Reservoir

**ABSTRACT.** PVT studies constitute a significant stage in the petroleum and gas fields' development. They consist of simulating the reservoir's depletion processes in the laboratory, which occur as a consequence of hydrocarbons production. The progression of these tests, under controlled conditions, allows the reservoir fluid characterization as a last resort. As might be expected, the use of efficient measuring equipment has a considerable impact on the reliability of the PVT data obtained in the laboratory. Hence, the purpose of this research is to conduct a fine-tuning of the Chandler PVT 3000 system by Chandler Engineering manufacturer, for experimental measurements of pressure, volume, and temperature by running conventional tests on gas condensate reservoir samples. To achieve the objective of this research, a descriptive and experimental design methodology was implemented. In this same context, the automatic system's components have been assembled, reconditioned, calibrated, and then basic PVT tests performed, consisting of flash separation, constant composition expansion (CCE), and constant volume depletion (CVD); from which satisfactory results obtained. Likewise, the consistency of CVD results was verified by applying Hoffman's validation criteria as well as the molar balance method. Whereas the consistency of CCE results verified by using an extension of the Y function, which is frequently used to validate the data of this test in blackoil samples. The implemented modification, known as the  $Y_{EXT}$  function, allowed to check the consistency of the experimental dew point measurements. On the other hand, the experimental parameters ( $P_{dew}$ ,  $^{\circ}API$ , GOR,  $\beta_g$ ) contrasted with those estimated by running the PVTsim compositional simulator, considering a macro error acceptance level of 25% in the sum of the four PVT parameters studied. The results obtained make possible to conclude that for the gas condensate sample analyzed, the equation of state that best matched the experimental parameters was the PR-78 equation. Due to the results obtained in this research, it is necessary to highlight that the Chandler PVT 3000 system is in optimal condition to carry out conventional PVT tests on gas condensate reservoir samples.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xx
ÍNDICE DE TABLAS .....	xxix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
EL PROBLEMA .....	3
Planteamiento del problema.....	3
Objetivos de la Investigación .....	5
Objetivo general .....	5
Objetivos específicos .....	5
Alcance.....	6
Justificación.....	6
Limitaciones.....	7
CAPÍTULO II .....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
Antecedentes .....	8
Fundamento teórico.....	11
1. Comportamiento de fases de fluidos de yacimientos de hidrocarburos .....	11
1.1. Aspectos generales .....	11

1.2.	Clasificación de fluidos de yacimientos de hidrocarburos.....	13
1.2.1.	Yacimientos de petróleo negro .....	14
1.2.2.	Yacimientos de petróleo volátil .....	15
1.2.3.	Yacimientos de gas seco .....	16
1.2.4.	Yacimientos de gas húmedo .....	17
1.2.5.	Yacimientos de gas condensado .....	18
2.	Propiedades de los hidrocarburos.....	21
2.1.	Mezclas de petróleo.....	21
2.1.1.	Densidad del petróleo ( $\rho_o$ ). .....	21
2.1.2.	Gravedad específica del petróleo ( $\gamma_o$ ). .....	21
2.1.3.	Gravedad API ( $\gamma_{API}$ ).....	21
2.1.4.	Compresibilidad del petróleo ( $C_o$ ). .....	22
2.1.5.	Presión de burbuja ( $P_b$ ).....	22
2.1.6.	Factor volumétrico de formación del petróleo ( $B_o$ ). .....	22
2.1.7.	Factor volumétrico total o bifásico ( $B_t$ ).....	23
2.1.8.	Relación gas-petróleo en solución ( $R_s$ ). .....	24
2.1.9.	Viscosidad del petróleo ( $\mu_o$ ).....	25
2.2.	Mezclas de gases .....	26
2.2.1.	Peso molecular aparente ( $M_g$ ). .....	26

2.2.2.	Gravedad específica del gas ( $\gamma_g$ ).....	26
2.2.3.	Presión de rocío (Proc).....	26
2.2.4.	Factor de compresibilidad del gas ( $Z_g$ ).....	27
2.2.5.	Factor de compresibilidad bifásico ( $Z_{2f}$ ).....	27
2.2.6.	Factor volumétrico de formación del gas ( $B_g$ ).....	29
2.2.7.	Densidad del gas ( $\rho_g$ ).....	30
3.	Estudios experimentales (PVT) .....	31
3.1.	Muestreo.....	32
3.1.1.	Tipos de muestreo. ....	33
3.1.2.	Representatividad de las muestras. ....	38
3.2.	Estudios convencionales experimentales para fluidos de yacimiento (PVT) .....	39
3.2.1.	Prueba de liberación instantánea (flash) en una etapa. ....	41
3.2.2.	Prueba de expansión a composición constante (CCE).....	44
3.2.3.	Prueba de liberación diferencial (LD). ....	51
3.2.4.	Prueba de separadores.....	53
3.2.5.	Prueba de agotamiento a volumen constante (CVD).....	55
3.2.6.	Estudio de viscosidad.....	61
3.3.	Estudios especiales experimentales para fluidos de yacimiento (PVT) 63	

3.3.1.	Prueba de hinchamiento.....	64
3.3.2.	Determinación de la constante de equilibrio K.....	65
3.3.3.	Prueba de vaporización de múltiple contacto. ....	66
3.3.4.	Prueba de precipitación de asfáltenos.....	68
3.4.	Análisis composicional .....	69
3.4.1.	Cromatografía de gases.....	71
3.4.2.	Destilacion simulada.....	72
3.4.3.	Análisis PNA (Parafinas, Naftenos y Aromáticos).....	72
3.4.4.	Determinación del Peso Molecular promedio del líquido. ....	73
4.	Sistema Chandler PVT 3000.....	74
4.1.	Localización de componentes del Sistema Chandler PVT 3000 .....	77
4.2.	Descripción de los componentes del Sistema Chandler PVT 3000 .....	78
4.2.1.	Software Quizix PumpWorks.....	78
4.2.2.	Descripción de la pantalla del programa principal PVT 3000.....	82
4.2.3.	Gasómetro.....	89
4.2.4.	Separador Flash.....	94
4.2.5.	Bombas Quizix. ....	100
4.2.6.	Celda de recombinación.....	108
4.2.7.	Cilindro portamuestras.....	109

4.2.8. Horno.....	111
4.3. Equipos auxiliares.....	133
4.3.1. Cryette WR 5009.....	133
4.3.2. Bomba de vacío.....	134
4.3.3. Compresor neumático.....	135
5. Programa PVTsim.....	136
5.1. Introducción.....	136
5.2. Ecuaciones de estado usadas por PVTsim.....	138
5.2.1. Soave-Redlich-Kwong (SRK).....	138
5.2.2. SRK-Peneloux.....	139
5.2.3. PR/PR78.....	140
5.2.4. PR/PR78-Peneloux.....	141
5.3. Reglas clásicas para mezclas.....	142
CAPÍTULO III.....	143
MARCO METODOLÓGICO.....	143
Tipo de Investigación.....	143
Diseño de la Investigación.....	143
Metodología Experimental.....	144
1. Revisión bibliográfica.....	146

2.	Identificación de los componentes del sistema Chandler PVT 3000.....	146
3.	Ensamblaje de los componentes del sistema Chandler PVT 3000 .....	146
3.1.	Línea con conexiones cono-roscadas (autoclave).....	147
3.2.	Líneas con conexiones HIP .....	152
3.3.	Conexiones straight hembra.....	152
3.4.	Línea con conexiones swagelok (baja presión).....	155
3.5.	Conexión tipo aguja. ....	157
3.6.	Conexión de las tuberías de la bomba Quizix.....	158
3.7.	Conexión de las tuberías del cilindro portamuestras.....	160
3.8.	Instalación de válvulas de seguridad Ruska.....	161
3.9.	Conexión de las tuberías del separador flash.....	164
3.10.	Conexión de las tuberías del gasómetro.....	167
4.	Verificación del funcionamiento del sistema Chandler PVT 3000.....	171
4.1.	Encendido del sistema Chandler PVT 3000. ....	172
4.2.	Inicialización de los programas PVT 3000 y PumpWorks.....	172
4.3.	Verificación y operación de las bombas Quizix. ....	174
4.4.	Prueba de fugas.....	179
4.5.	Calibración del volumen de la celda auxiliar.....	180
4.6.	Calibración del transductor de presión.....	185

4.7.	Calibración de la presión barométrica. ....	186
4.8.	Mantenimiento de la celda de gas condensado. ....	187
4.9.	Mantenimiento del cilindro portamuestra. ....	199
5.	Ejecución de estudio PVT para determinar las propiedades termodinámicas y composición del fluido.....	200
5.1.	Obtención de muestras de fluidos de yacimiento.....	200
5.2.	Preparación de la muestra .....	200
5.3.	Inyección de la muestra.....	202
5.4.	Estudios experimentales (PVT) .....	207
5.4.1.	Proceso de liberación instantánea (flash) en una etapa.....	207
5.4.2.	Proceso de expansión a composición constante (CCE). ....	226
5.4.3.	Agotamiento a volumen constante (CVD).....	230
5.5.	Apagado y desmontaje del sistema .....	235
5.6.	Cálculo de la composición total de la muestra.....	238
5.6.1.	Cálculo de la composición del gas.....	238
5.6.2.	Cálculo de la composición del líquido.....	239
6.	Comparación de las propiedades PVT experimentales con las estimadas mediante el uso del simulador PVTsim .....	243
CAPÍTULO IV.....		248
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....		248

Revisión del manual de usuarios del sistema Chandler PVT 3000 de <i>Chandler Engineering</i> .....	248
Revisión e instalación de los componentes del sistema Chandler PVT 3000.....	250
1. Revisión del panel de control .....	251
1.1. Las conexiones de cables .....	251
1.2. Encendido de los equipos y monitores.....	251
1.3. Funcionamiento del programa PVT3000 .....	251
2. Revisión de los subcomponentes del horno y sistema de flujo .....	251
2.1. Celda bomba.....	251
2.2. Celda de gas condensado (celda auxiliar) .....	252
2.3. Mini-celda .....	252
2.4. Viscosímetro capilar.....	252
2.5. Sistema de resonancia acústica (ARS).....	253
2.6. Sistema de flujo.....	253
3. Revisión de las bombas Quizix .....	254
3.1. Funcionamiento del programa PumpWorks.....	254
3.2. Tuberías y válvulas .....	255
4. Revisión del gasómetro .....	257
5. Revisión del separador .....	257

6. Revisión del cilindro portamuestra .....	258
7. Revisión de equipos auxiliares.....	258
7.1. Crioscopio Cryette WR 5009 .....	258
7.2. Bomba de vacío.....	259
7.3. Compresor de aire .....	259
Prueba de fugas .....	259
Calibración del volumen de la celda auxiliar .....	259
Ejecución de estudio PVT convencional en el sistema Chandler PVT 3000.....	260
1. Liberación instantánea en una etapa (flash inicial).....	262
2. Prueba de expansión a composición constante (CCE).....	265
3. Prueba de agotamiento a volumen constante (CVD).....	270
Consistencia de las pruebas PVT .....	273
1. Balance molar.....	273
2. Criterio de Hoffman, Crump y Hoccott .....	275
Comparación de las propiedades de fluidos de yacimientos generadas mediante simulación y las obtenidas por el Sistema Chandler PVT 3000 .....	276
CAPÍTULO V .....	279
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	279
Conclusiones .....	279

Recomendaciones.....	281
LISTA DE REFERENCIAS .....	282
APÉNDICES.....	284

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fases generalizado. ....	12
Figura 2. Diagrama de fases de un petróleo negro. ....	15
Figura 3. Diagrama de fases de un petróleo volátil. ....	16
Figura 4. Diagrama de fases de un gas seco. ....	17
Figura 5. Diagrama de fases de un gas húmedo. ....	18
Figura 6. Diagrama de fases de un gas condensado. ....	19
Figura 7. Factor volumétrico de formación del petróleo versus presión. ....	23
Figura 8. Factor volumétrico bifásico o total. ....	24
Figura 9. Relación gas-petróleo en solución versus presión. ....	25
Figura 10. Agotamiento de presión isotérmico e isovolumétrico en una celda PVT. ....	28
Figura 11. Factor volumétrico de formación del gas versus presión. ....	30
Figura 12. Transición de fases en un yacimiento de petróleo subsaturado. ....	32
Figura 13. Herramienta WTF compensada antes y después de tomar la muestra. ....	34
Figura 14. Herramienta DST. ....	35
Figura 15. (a) Toma de muestra de gas en el separador y (b) toma de muestra de líquido en el separador. ....	37
Figura 16. Estudios PVT convencionales de acuerdo con el tipo de fluido. ....	39
Figura 17. Pruebas PVT convencionales y métodos de validación para petróleo negro y volátil. ....	40

Figura 18. Pruebas PVT convencionales y métodos de validación para gas condensado.....	40
Figura 19. Liberación instantánea (flash) en una etapa para un gas condensado. ....	42
Figura 20. Arreglo de separador y tanque de prueba. ....	43
Figura 21. Expansión a composición constante para petróleo negro. ....	45
Figura 22. Relación presión-volumen para petróleo negro.....	46
Figura 23. Función Y vs presión.....	47
Figura 24. (a) Presión de burbuja subestimada y (b) sobrestimada. ....	48
Figura 25. Expansión a composición constante para gas condensado. ....	49
Figura 26. Relación presión-volumen para un gas condensado. ....	50
Figura 27. Variación del volumen de condensado retrogrado con presión.....	51
Figura 28. Liberación diferencial para petróleo negro.....	52
Figura 29. Prueba de separadores de tres etapas para petróleo negro.....	54
Figura 30. Prueba de agotamiento a volumen constante.....	56
Figura 31. Celda PVT en estado bifásico a $P_1 < P_{oc}$ . ....	58
Figura 32. Celda PVT en estado bifásico a $P_k < P_{oc}$ . ....	58
Figura 33. Conceptualización de la prueba CVD entre las presiones $P_{k-1}$ y $P_k$ ( $P_{k-1} > P_k$ ).....	59
Figura 34. Estudios especiales de acuerdo con el tipo de fluido.....	64

Figura 35. Esquema de la expansión del volumen del petróleo durante la prueba de hinchamiento.....	65
Figura 36. Comportamiento de las constantes de equilibrio.....	66
Figura 37. Esquema de la prueba de múltiple contacto. ....	67
Figura 38. Estructura de asfáltenos en un crudo venezolano. ....	68
Figura 39. Procedimiento de recombinación de muestras tomadas de la liberación flash para obtener la composición del fluido original de una muestra de fondo; WTF= muestreador; GC= cromatografía de gas; LC= cromatografía de líquido; DC= depresión punto de congelamiento; y DM= densímetro. ....	71
Figura 40. Sistema Chandler PVT 3000. ....	74
Figura 41. Componentes del Sistema Chandler PVT 3000.....	77
Figura 42. Ventana principal del software PumpWorks. ....	79
Figura 43. Barra de estado de la ventana principal. ....	82
Figura 44. Pantalla principal del programa PVT 3000. ....	83
Figura 45. Panel de control de la Celda Bomba.....	85
Figura 46. Panel de control de la Celda Auxiliar. ....	87
Figura 47. Pantalla de control de movimiento (modo incremental).....	88
Figura 48. Control de temperatura. ....	89
Figura 49. Gasómetro modelo 2331d.....	90
Figura 50. Esquema de funcionamiento del gasómetro 2331d. ....	92
Figura 51. Separador flash. ....	95

Figura 52. Esquema de funcionamiento del separador flash (vista frontal).....	96
Figura 53. Esquema de funcionamiento del separador flash (vista dorsal).....	97
Figura 54. Bomba Quizix 6120.....	101
Figura 55. Ventana principal del programa PumpWorks.....	103
Figura 56. Modos de operación de la bomba Quizix. ....	106
Figura 57. Celda de recombinación. ....	109
Figura 58. Cilindros portamuestras.....	110
Figura 59. Vista transversal del cilindro portamuestras.....	111
Figura 60. Diagrama de flujo del sistema Chandler PVT 3000. ....	112
Figura 61. Celda bomba para estudios PVT en muestras de petróleo.....	116
Figura 62. Vista transversal (a) celda bomba y (b) cabezal de la celda bomba. ....	118
Figura 63. Celda de gas condensado (celda auxiliar).....	121
Figura 64. Monitor del boroscopio de la celda auxiliar. ....	122
Figura 65. Vista transversal de la celda de gas condensado. ....	125
Figura 66. Mini celda. ....	128
Figura 67. Celda ARS. ....	129
Figura 68. Esquema de funcionamiento de ARS. ....	130
Figura 69. Viscosímetro capilar. ....	132
Figura 70. Partes del viscosímetro capilar. ....	133

Figura 71. Equipo Cryette WR para mediciones de peso molecular del crudo. ....	134
Figura 72. Bomba de vacío modelo 5XB HOOZO.....	135
Figura 73. Compresor de aire modelo Fiac AB 100/268. ....	136
Figura 74. Línea con conexión autoclave. ....	148
Figura 75. Herramienta para realizar cono.....	148
Figura 76. Manipulación de la herramienta para hacer cono. ....	149
Figura 77. Ajuste de la rosca de la herramienta. ....	149
Figura 78. Tarraja (herramienta para fabricar roscas).....	150
Figura 79. Cono y rosca elaborados.....	151
Figura 80. Conexión autoclave terminada. ....	151
Figura 81. Línea con conexión HIP. ....	152
Figura 82. Herramienta para conificar líneas. ....	154
Figura 83. Línea con conexión straight hembra.....	154
Figura 84. Adaptador con conexión tipo straight.....	155
Figura 85. Elementos básicos swagelok. ....	156
Figura 86. Línea con conexión swagelok terminada.....	156
Figura 87. Reductores de diámetro. ....	157
Figura 88. Conexión tipo aguja.....	158
Figura 89. Instalación de las tuberías de la bomba Quizix. ....	159

Figura 90. Instalación de las tuberías del cilindro de muestras.....	161
Figura 91. Arreglo de válvulas de seguridad Ruska. ....	162
Figura 92. Instalación válvulas de seguridad. ....	163
Figura 93. Proceso de elaboración del niple reductor de diámetro. ....	164
Figura 94. Válvula de entrada al separador flash de dos etapas.....	166
Figura 95. Separador flash conectado el equipo de baño térmico.....	167
Figura 96. Instalación de la conexión tipo cruz al gasómetro.....	168
Figura 97. Instalación parte superior de la conexión tipo cruz. ....	169
Figura 98. Instalación parte inferior de la conexión tipo cruz. ....	169
Figura 99. Instalación parte frontal de la conexión tipo cruz.....	170
Figura 100. Vial y agujas. ....	171
Figura 101. Conexión tipo cruz del gasómetro. ....	171
Figura 102. Pantalla principal del programa PVT 3000. ....	173
Figura 103. Condición de inicio en Quizix PumpWorks. ....	174
Figura 104. Condición de presión de seguridad en Quizix PumpWorks. ....	174
Figura 105. Esquema de los equipos de laboratorio para la calibración del volumen de la celda auxiliar. ....	181
Figura 106. Calibración de volumen de la celda auxiliar.....	183
Figura 107. Pantalla de calibración del transductor de presión de la celda auxiliar.	186

Figura 108. Pantalla de calibración del transductor de presión barométrica. ....	187
Figura 109. Varilla de latón para remover anillos tipo o-ring.....	191
Figura 110. Herramienta espacial para remover sellos TFE.....	192
Figura 111. Disposición de cintas térmicas alrededor del cilindro portamuestra. ...	201
Figura 112. Calentamiento del cilindro portamuestra.....	202
Figura 113. Esquema de los equipos de laboratorio para la inyección de la muestra. .....	203
Figura 114. Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba liberación instantánea.....	208
Figura 116. Posición de las válvulas del gasómetro para el vacío. ....	210
Figura 117. Transferencia del gas del gasómetro al cilindro sumergido en nitrógeno líquido. ....	214
Figura 118. Viales para la recolección de líquido condensado.....	214
Figura 119. Cromatógrafo de gases HP 6890. ....	220
Figura 120. Cromatógrafo de líquido para análisis PNA.....	220
Figura 121. Crioscopio Cryette de rango amplio WR 5009.....	221
Figura 122. Densímetro digital DMA 4500M. ....	225
Figura 123. Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba CCE.....	227
Figura 124. Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba CVD. ....	231
Figura 125. Desplazamiento de volumen de muestra al vial mediante apertura de válvula MV5. ....	235

Figura 126. Apagado seguro del sistema Chandler PVT 3000. ....	237
Figura 127. Hoja de cálculo de las propiedades del gas a partir de los datos de composición. ....	239
Figura 128. Determinación de la composición total del fluido de yacimiento. ....	242
Figura 129. Esquema descriptivo del procedimiento para obtener la composición total del fluido. ....	243
Figura 130. Ventana inicial del programa PVTsim. ....	244
Figura 131. Ventana para introducir datos del pozo y la composición total del fluido de yacimiento. ....	245
Figura 132. Ventana para introducir los datos de las condiciones de separación (presión y temperatura) y la temperatura de yacimiento. ....	246
Figura 133. Hoja donde se presentan los resultados de los parámetros simulados..	247
Figura 134. Instalación de líneas de corriente. ....	250
Figura 135. Interruptores y sensores límite para el control de viaje de la celda bomba. ....	252
Figura 136. Ensamblaje de puertos y válvulas de seguridad del sistema Chandler PVT 3000. ....	254
Figura 137. Instalación de las líneas flexibles de distribución de aire. ....	255
Figura 138. (a) Bombas en condiciones iniciales, (b) bombas completamente instaladas. ....	257
Figura 139. Re-disposición del equipo de baño térmico. ....	258
Figura 140. Sellos de la celda auxiliar. ....	260

Figura 141. Relación presión-volumen del fluido. Prueba CCE.....	266
Figura 142. Formación de líquido retrogrado durante la prueba CCE.....	267
Figura 143. Función YEXT y presión para la muestra de gas condensado. ....	269
Figura 144. Grafico para determinar la presión del punto de rocío mediante el método de la función YEXT para la muestra de gas condensado.....	269
Figura 145. Variación de la composición del gas retirado, (producido) con presión. ....	271
Figura 146. Comportamiento de la presión, volumen y temperatura durante de la ejecución de la prueba CVD (programa PVT 3000).....	272
Figura 147. Criterio de Hoffman-Crump para la validación de las constantes de equilibrio ( $K_i$ ), solo los componentes hidrocarburos, gas condensado WD. ....	275
Figura 148. Diagrama de fases para la muestra de gas condensado. ....	278

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica de mezclas provenientes de yacimientos de hidrocarburos.....	14
Tabla 2. Ventajas y desventajas del muestreo de fondo.....	36
Tabla 3. Ventajas y desventajas del muestreo de separador. ....	37
Tabla 4. Ventajas y desventajas del muestreo de cabezal. ....	38
Tabla 5. Valores de $b_i$ y $T_{b_i}$ . (Rojas, 2003).....	60
Tabla 6. Conversión viscosidad Saybolt a viscosidad cinemática. (Ramírez, 2015)..	63
Tabla 7. Ventanas de la barra de menú. (Chandler, 2008).....	79
Tabla 8. Ventanas de la barra de estado. (Chandler, 2008).....	82
Tabla 9. Ventanas de la barra de menú. (Chandler, 2008).....	84
Tabla 10. Modos de control de la celda bomba. (Chandler 2009). ....	85
Tabla 11. Componentes del gasómetro 2331d. (Chandler, 2014).....	92
Tabla 12. Componentes del separador flash 2353. (Chandler, 2009). ....	97
Tabla 13. Ítems de la ventana Control y Datos de la Bomba. (Chandler,2008).....	104
Tabla 14. Modos de operación de las bombas. (Chandler 2008). ....	106
Tabla 15. Función de válvulas y puertos del horno. (Chandler, 2009). ....	113
Tabla 16. Descripción elementos de la celda bomba. ....	119
Tabla 17. Elementos de la celda de gas condensado. (Chandler, 2009). ....	126

Tabla 18. Partes del sistema de resonancia acústica (ARS). (Chandler, 2009). .....	131
Tabla 19. Relación de pesos entre la masa de muestra y benceno. ....	223
Tabla 20. Identificación de la muestra. ....	262
Tabla 21. Datos experimentales de la liberación instantánea (muestra WD). ....	262
Tabla 22. Resultados de las propiedades obtenidas del flash. ....	263
Tabla 23. Composición del fluido de yacimiento (muestra WD) a 289,9 °F y 8985,8 lpca. ....	264
Tabla 24. Expansión a composición constante del fluido WD a 289,9 °F. ....	265
Tabla 25. Datos calculados de $Y_{EXT}$ y $\text{Log } Y_{EXT}$ para la muestra de gas condensado. .....	268
Tabla 26. Análisis composicional del gas producido en la prueba de agotamiento a volumen constante a 289,9 °F. ....	270
Tabla 27. Datos preliminares usados en el balance molar. ....	273
Tabla 28. Composición molar del líquido condensado ( $X_i$ ) para la muestra de gas condensado. ....	274
Tabla 29. Constantes de equilibrio ( $K_i$ ) por etapa de agotamiento. ....	275
Tabla 30. Resultados de la simulación de la muestra de gas condensado. ....	277

## INTRODUCCIÓN

El estudio de las propiedades termodinámicas de los fluidos contenidos en yacimientos de hidrocarburos bajo condiciones cambiantes de presión, volumen y temperatura se conoce como análisis PVT, y son de gran importancia para la gerencia y el desarrollo eficiente de los campos petrolíferos. En general, los estudios PVT están diseñados para simular en el laboratorio los procesos de recuperación característicos de la vida productiva del yacimiento. Sin embargo, se hace necesario resaltar que se trata de experimentos que involucran complejos instrumentos de medición, cuya condición está estrechamente relacionada con la fiabilidad de la data obtenida.

En cuanto a la estructura misma de la investigación, está conformada por un primer capítulo en el que se expone el planteamiento del problema; los objetivos de esta investigación, en forma general relacionado a la ejecución de puesta a punto de sistema automático Chandler PVT 3000 para mediciones de presión, volumen y temperatura, y los objetivos específicos que describen un conjunto de acciones para alcanzar al objetivo general. Seguidamente, se presenta el alcance y las limitaciones del trabajo a realizar. Finalmente, se sintetiza la importancia de esta investigación en el cuerpo de la justificación.

Por otra parte, en el segundo capítulo son citados tres antecedentes de la investigación referidos a la ejecución de pruebas experimentales, y de simulación que otros autores han implementado y que son de gran aporte para esta investigación. Asimismo, se cubre en líneas generales el fundamento teórico, enfocado en la operatividad y/o funcionalidad del sistema y conceptos de ingeniería de yacimientos.

Seguidamente, en el tercer capítulo se expresa el diseño metodológico que se siguió para la consecución de los objetivos planteados, el tipo de investigación que se adopta, y la descripción de la metodología experimental a emplear para obtener resultados eficaces.

En este orden de ideas, en el cuarto capítulo se presentan y analizan todos los resultados obtenidos en esta investigación durante el desarrollo y/o evolución de la metodología experimental establecida.

Finalmente, en el capítulo cinco se establecen un conjunto de conclusiones y recomendaciones enfocados en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, con respecto a los objetivos formulados en esta investigación.

## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA

#### Planteamiento del problema

Ahmed (2001), señala en su libro *Reservoir engineering handbook*, que los estudios de laboratorio precisos de Presión-Volumen-Temperatura (PVT) y el comportamiento de fases de fluidos de yacimientos son necesarios para caracterizar estos fluidos y evaluar su desempeño volumétrico a varios niveles de presión.

No obstante, Eyton (1987) en su artículo *Practical limitations in obtaining PVT data for gas condensate systems*, señala que los modelos de simulación composicional basados en ecuaciones de estado (EoS) están siendo usados cada vez más para el estudio de los procesos de agotamiento en yacimientos de hidrocarburos, particularmente en yacimientos de gas condensado. Sin embargo, la predicción del comportamiento de fases de sistemas de hidrocarburos aplicando las ecuaciones de estado tradicionales es por naturaleza poco fiable. Las imprecisiones en la predicción del comportamiento de fases pueden ser atribuidas a bases teóricas pobres del modelo y a una escasez de detalle en el análisis del fluido de yacimiento. Atendiendo a estas consideraciones, si no se utilizan datos PVT experimentales para afinar las EoS, entonces las predicciones cuantitativas serán de poco valor. De ahí que el desarrollo de modelos de simulación de yacimientos sea críticamente dependiente de la calidad de la data PVT experimental.

Por otra parte, de acuerdo con este autor, los datos PVT son generados en el laboratorio a través de estudios llevados a cabo en celdas visuales, usando muestras de fluidos tomadas en campo durante pruebas en el pozo. Sin embargo, los resultados experimentales obtenidos no están libres de errores sistemáticos y fortuitos; estos son

dependientes del tipo de equipamiento utilizado. Los equipamientos libres de mercurio producen errores más grandes que los antiguos equipamientos a base de mercurio. Una fuente común de errores en los nuevos equipamientos está asociada con las mediciones experimentales de pequeños volúmenes de líquido.

De este modo, basados en la importancia que tienen las medidas de PVT para la caracterización de los fluidos de yacimientos y el subsiguiente desarrollo de modelos de simulación de yacimientos, se requiere de metodologías y equipamientos que permitan obtener resultados experimentales con la menor incertidumbre posible y con mayor confiabilidad para el objeto que estas medidas tienen en la gestión de yacimientos.

Actualmente, la Escuela de Ingeniería de Petróleo de la Universidad Central de Venezuela, cuenta con un sistema multi-tarea preciso, libre de mercurio y de avanzada definición tecnológica que permite ejecutar estudios PVT en fluidos de yacimientos, en condiciones de elevada presión y temperatura. Este sistema automático denominado Sistema Chandler PVT 3000 del fabricante *Chandler Engineering*, requiere de su instalación, activación, calibración, y ejecución de pruebas que permitan la puesta a punto y por consecuencia el establecimiento de una metodología de uso.

## Objetivos de la Investigación

### *Objetivo general*

Realizar puesta a punto del sistema Chandler PVT 3000 para estudios PVT y caracterización termodinámica de fluidos de yacimientos.

### *Objetivos específicos*

1. Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte de medidas experimentales de propiedades PVT en el laboratorio.
2. Identificar los componentes que constituyen el sistema Chandler PVT 3000 de *Chandler Engineering*.
3. Realizar el ensamblaje de los componentes del sistema Chandler PVT 3000.
4. Ejecutar la calibración de los componentes del sistema Chandler PVT 3000.
5. Realizar estudio PVT convencional a una muestra de fondo de gas condensado para determinar sus propiedades termodinámicas y composición.
6. Contrastar las propiedades termodinámicas del fluido obtenidas mediante el uso del sistema Chandler PVT 3000 con las propiedades estimadas a partir de simulaciones composicionales.

### **Alcance**

Esta investigación tiene como alcance, la puesta a punto del sistema Chandler PVT 3000 de *Chandler Engineering*, para determinar las propiedades termodinámicas y composición química de fluidos de yacimientos de gas condensado, a partir de la aplicación de estudios PVT convencionales; y la comparación de estas propiedades con las estimadas por la aplicación de simulaciones composicionales.

### **Justificación**

El estudio de las propiedades termodinámicas y el comportamiento de fases de los fluidos contenidos en yacimientos de hidrocarburos requieren el uso de instrumentos y/o técnicas que proporcionen resultados fiables, con la menor incertidumbre posible. Por lo tanto, es importante realizar mediciones experimentales de Presión-Volumen-Temperatura en el laboratorio mediante pruebas diseñadas para simular los procesos de agotamiento del yacimiento utilizando muestras de fluidos representativas del yacimiento en el sistema Chandler PVT 3000 de Chandler Engineering, ya que el mismo es versátil, automatizado, permitiendo ejecutar pruebas PVT en muestras de petróleo y gas condensado. En tal sentido, es necesario la puesta a punto del sistema de medición.

La investigación planteada contribuirá a impulsar la puesta en marcha del sistema Chandler PVT 3000 para estudios PVT. Asimismo, los resultados del estudio ayudaran de forma sustancial a la preparación integral de los universitarios ucevistas, así como del personal profesional encargado de la operación de los equipos, en lo concerniente a esta faceta de la gestión de yacimientos. Adicionalmente, permitiría a la Escuela de Petróleo estar a la vanguardia en lo que respecta a la ejecución y análisis de estudios PVT en Venezuela.

Por otro lado, es posible generar recursos económicos mediante la prestación de servicios a empresas Públicas, Privadas y Mixtas. Estos recursos permitirían la

sustentabilidad y autogestión del laboratorio PVT de la universidad, concretando de esta manera un espacio de gran impacto para su desarrollo económico.

Finalmente, la particularidad mixta que caracteriza a esta investigación, implica acotar su evolución en dos espacios físicos diferenciados, a saber: el laboratorio PVT de la Escuela de Petróleo de la UCV y el laboratorio PVT del Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (INTEVEP), filial tecnológica de Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA). La empresa Estatal ha puesto a disposición de la UCV un equipo de especialistas en el área de estudios PVT para asesorar y supervisar todos los aspectos técnicos relacionados con los objetivos que esta investigación plantea.

### **Limitaciones**

1. Recursos económicos limitados en caso de presentarse falla en alguno de los equipos y componentes auxiliares del sistema Chandler PVT 3000 y requerir adquirir los repuestos pertinentes.
2. Dependencia de laboratorios especializados para llevar a cabo estudios complementarios de cromatografía en muestras de petróleo y gas y análisis de parafinas, naftenos y aromáticos (PNA) necesarios para la consecución de los experimentos, debido a que el laboratorio PVT de la UCV no cuenta con estos tipos de equipamientos.
3. Disponibilidad de las muestras representativas para llevar a cabo los estudios PVT en el laboratorio.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### Antecedentes

PERALTA, Y. (noviembre, 2003). Validación de datos experimentales PVT con fluidos de yacimientos con estudios de asfáltenos del oriente (norte de Monagas) y occidente de Venezuela utilizando el simulador composicional PVTsim. *Trabajo Especial de Grado presentado ante la Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería de Petróleo.*

En esta investigación la autora utilizó la versión 16 del simulador composicional PVTsim para cotejar los resultados experimentales PVT de crudos asfálténicos obtenidos a partir de 44 muestras de fondo de petróleo del Oriente y Occidente de Venezuela. Cuatro de las muestras se sometieron a ensayos experimentales PVT en los laboratorios de (PDVSA - INTEVEP), usando el sistema Chandler PVT modelo 2370; el resto de la data se obtuvo a partir de informes de estudios PVT. De esta data se extrajo la información de los cuatro parámetros (P<sub>sat</sub>, RGP, B<sub>o</sub>, gravedad API) que posteriormente fueron cotejados con las nueve ecuaciones de estado que contiene el simulador PVTsim en términos de error absoluto.

En este sentido, la autora mencionó que para las muestras de Oriente la ecuación de estado que mejor cotejó los parámetros estudiados fue la ecuación de PR78-Peneloux. De las muestras de Occidente se determinó que la cantidad seleccionada por el nivel de error de aceptación es muy pequeña para realizar un análisis que represente a las muestras de Occidente. El simulador no debe usarse si no se dispone de las propiedades del pseudocomponente ya que se obtienen errores mayores al 100% para ambas zonas del país.

Por otra parte, el aporte que genera la investigación antes descrita a este trabajo investigativo es primeramente de soporte teórico en cuanto a la descripción de los métodos de simulación que se han ejecutado para la predicción de las propiedades termodinámicas del fluido de yacimiento.

CAMACHO, M. (mayo, 2011). Estudio del efecto de la inyección de nitrógeno y dióxido de carbono sobre la composición y propiedades volumétricas de un gas condensado. *Trabajo Especial de Grado presentado ante la Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería de Petróleo.*

En esta investigación la autora traza como objetivo general determinar a través de pruebas experimentales PVT aplicadas a muestras de gas condensado el efecto que tiene la inyección de nitrógeno y dióxido de carbono a diferentes concentraciones, sobre las propiedades del fluido, tales como: presión de rocío, formación de líquido retrogrado, y composición de la muestra. El análisis de las muestras de gas condensado se llevó a cabo en los laboratorios de (PDVSA - INTEVEP), usando el sistema Chandler PVT modelo 3000 de la empresa.

Con este motivo se realizaron las pruebas de liberación instantánea, expansión a composición constante, y agotamiento a volumen constante; se evaluaron los cambios en la composición y las propiedades volumétricas que experimenta el fluido al inyectar 10% y 40% de  $N_2$  y  $CO_2$ . Asimismo, se describieron de forma general los métodos experimentales usados en el laboratorio para analizar las muestras.

En síntesis, los resultados permitieron concluir que ambos gases incrementan la presión de rocío y revaporizan el líquido retrogrado a medida que se incrementa el porcentaje de inyección, siendo el  $CO_2$  el que menos afecta las propiedades del gas condensado. Cabe destacar que la autora mencionó que la inyección de  $CO_2$  como la de  $N_2$  disminuyen el porcentaje de líquido retrogrado formado, respecto al fluido original. Sin embargo en ambos casos existe la desventaja de que el líquido retrogrado se forma a presiones más altas a la original.

En tal sentido, esta investigación aporta a este trabajo investigativo una descripción de los equipos y materiales utilizados en el desarrollo de las pruebas PVT en muestras de gas condensado en el sistema Chandler PVT 3000. Asimismo,

propicia al establecimiento de una metodología operacional más específica para el sistema de medición homólogo de la UCV, adaptada a la funcionalidad que este tiene en cuanto a las mediciones experimentales que permitan en última instancia determinar las propiedades termodinámicas del fluido de yacimiento.

DÁVILA, T. (abril, 2015). Metodología para la validación de pruebas PVT composicional en yacimientos de gas condensado. *Trabajo Especial de Grado presentado ante la Universidad del Zulia, Escuela de Ingeniería de Petróleo.*

En esta investigación la autora desarrolló una metodología para la validación de pruebas PVT composicional en yacimientos de gas condensado. La metodología propuesta por la autora incluye métodos específicos para la corrección de las principales inconsistencias encontradas en un análisis PVT para gas condensado, específicamente en las constantes de equilibrio provenientes de la prueba de agotamiento a volumen constante (CVD).

Para ello, recopiló información bibliográfica referente a los diferentes métodos existentes para validar pruebas PVT en muestras de gas condensado, analizó los pasos a implementar, y consecuentemente estableció los módulos y procedimientos que conforman la metodología. Posteriormente, aplicó la metodología propuesta a la data de dos yacimientos que contienen este tipo de fluidos.

Finalmente, se determinó que los resultados para una de las muestras en estudio no fueron consistentes según lo especificado por los criterios de validación correspondientes. Sin embargo, luego de aplicados los métodos de corrección pertinentes, los resultados para la muestra se ajustaron a los criterios establecidos. Los resultados permitieron concluir que la metodología diseñada, resultó ser una herramienta útil y de uso sencillo para probar la consistencia de pruebas PVT en yacimientos de gas condensado.

En este orden de ideas, la investigación anteriormente descrita aporta a este trabajo investigativo una metodología que permita evaluar la consistencia de las mediciones experimentales realizadas en el laboratorio.

## Fundamento teórico

### 1. Comportamiento de fases de fluidos de yacimientos de hidrocarburos

#### 1.1. Aspectos generales

Los fluidos de yacimientos de petróleo son mezclas de multicomponentes que consisten principalmente de hidrocarburos. El metano ( $\text{CH}_4$ ) es el componente más común presente en los fluidos de yacimientos. Debido a que el metano contiene un solo átomo de carbono, frecuentemente se hace referencia a este componente como  $\text{C}_1$ . De forma similar, el término  $\text{C}_2$  se utiliza para referirse al etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ),  $\text{C}_3$  para el propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y así sucesivamente. Los hidrocarburos con siete y más átomos de carbono son llamados componentes  $\text{C}_{7+}$ , y la entidad de todos los componentes  $\text{C}_{7+}$  son llamados fracción  $\text{C}_{7+}$ . La marca “+” indica que los componentes más pesados también están contenidos en esta fracción. Los fluidos de yacimientos de petróleo pueden contener hidrocarburos tan pesados como el  $\text{C}_{200}$  (Pedersen y Christensen, 2007).

Existen además, otros componentes no hidrocarburos como el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), frecuentemente encontrados en los fluidos de yacimientos de petróleo.

Por otra parte, durante la producción de los hidrocarburos la presión del yacimiento disminuye, y ocurren cambios en la composición de las mezclas gas-liquido, en el comportamiento de fases, y en sus propiedades termodinámicas. La mejor forma de observar estos cambios de fases de los fluidos contenidos en el yacimiento, es a través de un diagrama de fases como el mostrado en la figura 1. En general, cada mezcla de hidrocarburos encontrada en el yacimiento tendrá un diagrama de fases característico, el cual permanece constante mientras la composición de la mezcla no cambie. No obstante, se utilizará la figura 1 con el propósito de explicar las características más relevantes de un diagrama de fases.

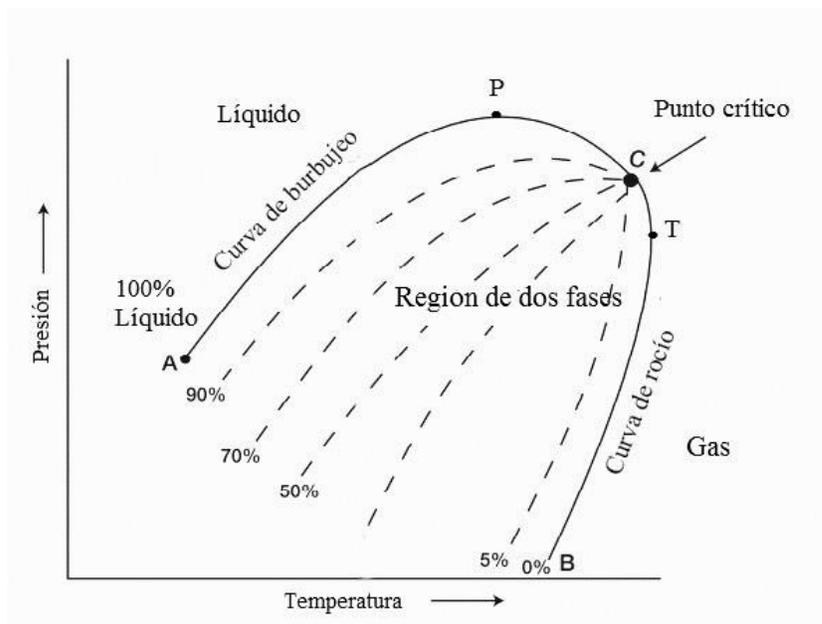


Figura 1. Diagrama de fases generalizado.

Fuente: (Ahmed T. , 2001).

El diagrama de fases está compuesto por las curvas de puntos de burbujeo (curva AC) y puntos de rocío (curva CB). En los puntos de burbujeo la mezcla de hidrocarburos se encuentra en fase líquida en equilibrio con una cantidad infinitesimal (burbuja) de gas. En los puntos de rocío la mezcla de hidrocarburos se encuentra en fase gaseosa en equilibrio con una cantidad infinitesimal (gota) de líquido (Rojas, 2003). Ambas curvas se encuentran en el punto crítico (C), donde las propiedades intensivas de ambas fases son iguales y las fases se vuelven indistinguibles. Los puntos extremos de la envolvente de fases, presión *cricondembárica* (P), y temperatura *cricondentérmica* (T), representan la máxima presión y temperatura respectivamente a la cual la mezcla líquido-gas coexiste en equilibrio termodinámico.

Al mismo tiempo, la envolvente de fases divide al diagrama en tres regiones, la del líquido, que está localizada por encima de la envolvente y a la izquierda de la temperatura crítica, la de gas que también está localizada por encima de la envolvente, pero a la derecha de la temperatura crítica, y la de dos fases que está

localizada dentro de la envolvente de fases y donde se hallan en equilibrio el líquido y el gas.

Dentro de la región de dos fases, se puede identificar las líneas de *isocalidad*; estas líneas unen puntos que representan igual porcentaje volumétrico de líquido. En consecuencia, las curvas de burbujeo y de rocío corresponden a curvas de 100% y 0% de líquido respectivamente. Las líneas de isocalidad convergen en el punto crítico C.

### 1.2. *Clasificación de fluidos de yacimientos de hidrocarburos*

Los fluidos de yacimientos de hidrocarburos pueden ser clasificados en: petróleo negro, petróleo volátil, gas condensado, gas húmedo y gas seco.

De acuerdo lo indicado por Rojas (2003), los parámetros que se consideran de utilidad en esta clasificación pueden dividirse en dos grupos:

- Aquellos que se miden en el campo durante las pruebas de producción: Presión, temperatura, relación gas-líquido (RGL), gravedad API y color del líquido en el tanque.
- Aquellos que se obtienen en el laboratorio a partir de muestras representativas y simulando el comportamiento de los fluidos durante el agotamiento de presión.

La información de producción (especialmente la RGL) usualmente es un buen indicador del tipo de fluido en el yacimiento. Sin embargo, cabe aclarar que el tipo de fluido en el yacimiento sólo puede ser confirmado mediante la observación en el laboratorio.

A continuación, en la tabla 1 se muestra la composición molar típica determinada en el laboratorio de las mezclas pertenecientes a los cinco tipos de fluidos, así como los parámetros característicos de cada uno de ellos.

Tabla 1. Composición típica de mezclas provenientes de yacimientos de hidrocarburos.

Componente	Gas seco	Gas húmedo	Gas condensado	Petróleo volátil	Petróleo negro
C <sub>1</sub>	96,0	90,0	75,0	60,0	48,83
C <sub>2</sub>	2,0	3,0	7,0	8,0	2,75
C <sub>3</sub>	1,0	2,0	4,5	4,0	1,93
iC <sub>4</sub> – nC <sub>4</sub>	0,5	2,0	3,0	4,0	1,60
iC <sub>5</sub> – nC <sub>5</sub>	0,5	1,0	2,0	3,0	1,15
C <sub>6</sub>	-	0,5	2,5	4,0	1,59
C <sub>7+</sub>	-	1,5	6,0	17,0	42,15
Mc <sub>7+</sub>	-	115 gr/gr-mol	125 gr/gr-mol	180 gr/gr-mol	225 gr/gr-mol
RGL,PCN/BN	-	26000	7000	2000	625
°API	-	60°	55°	50°	34,3°
Líquido de Tanque (color)	-	Incoloro Amar. claro	Amar. Claro Amarillo	Amarillo oscuro	Negro

Fuente: (Rojas, 2003).

### 1.2.1. Yacimientos de petróleo negro

Como se puede observar en la tabla 1 estos yacimientos se caracterizan por un bajo contenido de metano (C<sub>1</sub><50%) y un alto contenido de C<sub>7+</sub> (>20%) (Rojas, 2003). El diagrama de fases de un petróleo negro típico se muestra en la figura 2. La temperatura de estos yacimientos es menor a la temperatura crítica de la mezcla de hidrocarburos.

La línea vertical  $\overline{EF}$  indica la reducción isotérmica de la presión que ocurre en el yacimiento durante la producción. Cuando la presión del yacimiento es mayor a la presión del punto de burbuja (punto E), el yacimiento es considerado subsaturado y se encuentra completamente en fase líquida. En este sentido, McCain (1990) se refiere al término subsaturado para indicar el estado en el cual es posible disolver más gas en el petróleo, si más gas estuviera presente.

Por otra parte, si la presión del yacimiento es la del punto de burbuja, el petróleo es considerado saturado. En este punto, ya no es posible que el petróleo

contenga más gas disuelto. Una reducción en presión ocasionará liberación de gas en solución para formar una fase de gas en el yacimiento.

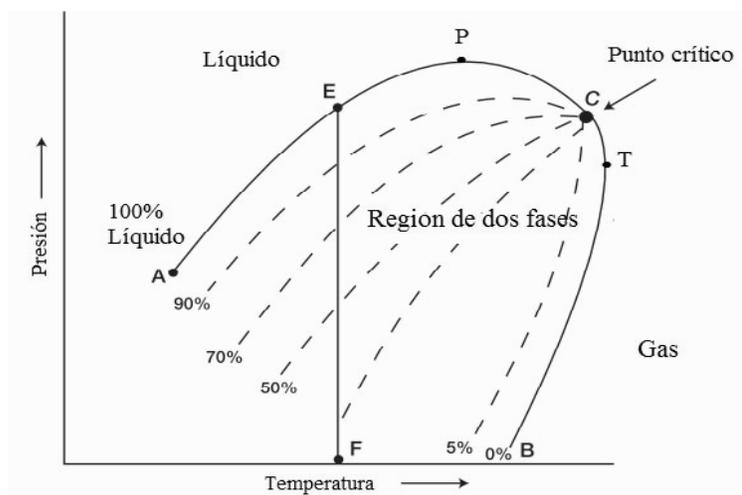


Figura 2. Diagrama de fases de un petróleo negro.

Fuente: (Ahmed T., 2001).

Algunas de las características de los yacimientos de petróleo negro se indican a continuación:

- RGL inicial de 1750 PCN/BN o menor (Rojas, 2003).
- El petróleo del tanque de almacenamiento usualmente tendrá una gravedad menor que 45 ° API (Rojas, 2003).
- El petróleo del tanque de almacenamiento es negro o verde oscuro (Rojas, 2003).
- Factor volumétrico menor que 1,5 BY/BN (Rojas, 2003).

### 1.2.2. Yacimientos de petróleo volátil

En la tabla 1 se muestra la composición típica de un petróleo volátil; estos fluidos contienen menos componentes pesados y más componentes intermedios que los petróleos negros. El diagrama de fases de un petróleo volátil es mostrado en la figura 3. La temperatura de estos yacimientos es menor a la temperatura crítica de la

mezcla pero muy cercana a esta. Es de hacer notar que las líneas de isocalidad se encuentran muy juntas y cercanas a la curva de burbujeo; en consecuencia, una pequeña reducción de presión por debajo del punto de burbuja (E) vaporizará una fracción significativa del petróleo, de aquí el nombre petróleo volátil (Danesh, 1998).

La línea vertical  $\overline{EF}$  muestra el agotamiento isotérmico de presión durante la producción. Como en el caso anterior, los yacimientos de petróleo volátil pueden ser saturados ( $P_i=P_b$ ) o subsaturados ( $P_i>P_b$ ). Según lo expuesto por (Rojas, 2003) los petróleos volátiles son crudos de colores amarillo oscuro hasta negro, con gravedad API de 40° o mayores, factor volumétrico mayor que 1,5 BY/BN, y RGL en el rango de 1750 a 3200 PCN/BN.

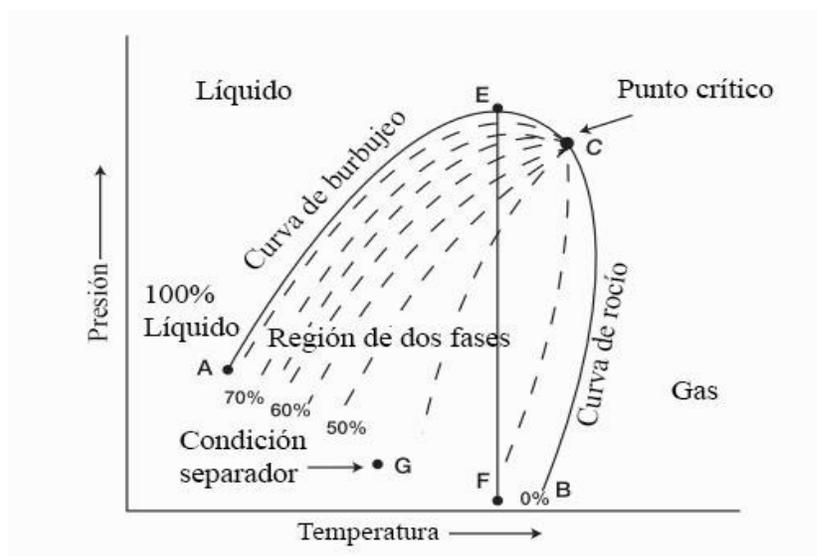


Figura 3. Diagrama de fases de un petróleo volátil.

Fuente: (Ahmed T, 2001).

### 1.2.3. Yacimientos de gas seco

Como se puede observar en la tabla 1 los gases secos están compuestos principalmente por metano ( $C_1>90\%$ ), con algunos componentes intermedios. La temperatura del yacimiento es mayor que la temperatura cricondentérmica de la mezcla de hidrocarburos y debido al alto contenido de componentes volátiles del gas

seco, la condensación de líquido sólo se alcanza mediante procesos criogénicos. En la figura 4 se muestra el diagrama de fases típico de un gas seco.

La línea vertical  $\overline{AB}$  muestra el agotamiento isotérmico de presión durante la producción, y ni a las condiciones de yacimiento ni a las condiciones de separación en superficie la mezcla entra en la región de dos fases, por lo que siempre se mantiene en estado gaseoso. De acuerdo con De Ferrer (2009), cuando se produce con una RGL mucho mayor que 100000 PCN/BN, al fluido se le denomina normalmente gas seco.

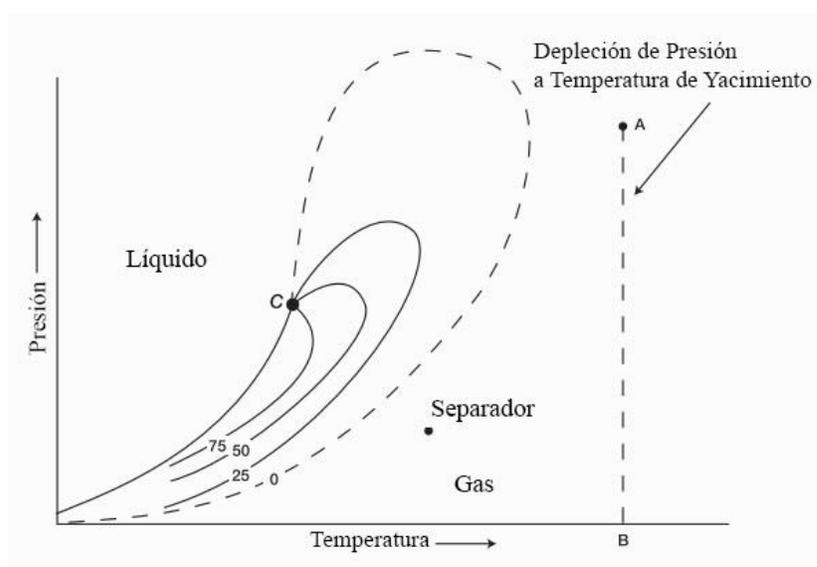


Figura 4. Diagrama de fases de un gas seco.

Fuente: (Ahmed T. , 2001).

#### 1.2.4. Yacimientos de gas húmedo

Como se puede apreciar en la tabla 1 los gases húmedos se caracterizan por un mayor contenido de componentes intermedios y pesados que los gases secos (Rojas, 2003). La temperatura del yacimiento es mayor que la temperatura cricondentérmica de la mezcla de hidrocarburos. El diagrama de fases típico de un gas húmedo se muestra en la figura 5. La línea vertical  $\overline{AB}$  indica el agotamiento isotérmico de presión durante la producción, donde claramente se puede observar que no existe

condensación de líquido a las condiciones de yacimiento ya que la mezcla nunca entra en la región de dos fases.

Por otra parte, a las condiciones de separación en superficie la mezcla cae en la región de dos fases y se produce condensación parcial del gas. En efecto, y de acuerdo con lo indicado por Rojas (2003), se condensa aproximadamente un 6% del volumen de la mezcla producida, generando relaciones gas-liquido mayores que 15000 PCN/BN. A su vez, según McCain (1990), el líquido del tanque tiende a ser incoloro con gravedad API mayor que 60°.

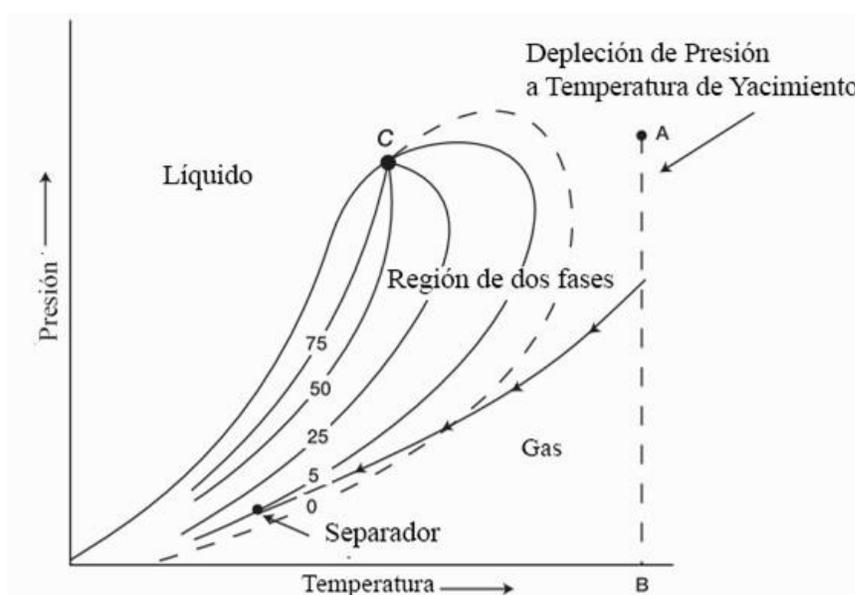


Figura 5. Diagrama de fases de un gas húmedo.

Fuente: (Ahmed T, 2001).

### 1.2.5. Yacimientos de gas condensado

Los gases condensados contienen todavía principalmente metano ( $C_1 > 60\%$ ) como en el caso de los gases secos y húmedos; aunque el contenido de componentes más pesados es mayor como se puede observar en la tabla 1. La temperatura del yacimiento se ubica entre la crítica y la cricondentérmica de la mezcla. En la figura 6 se presenta el diagrama de fases de un gas condensado.

La línea vertical  $\overline{14}$  indica las condiciones del yacimiento. En el punto 1 la mezcla existe como gas; al disminuir la presión al punto 2, la intensidad de las fuerzas intermoleculares entre las moléculas livianas y pesadas disminuye, ocasionando que se alejen unas de otras. Al continuar la disminución de la presión, la atracción entre las moléculas pesadas se vuelve más efectiva, ocurriendo condensación retrograda de líquido al cruzar la curva de rocío.

Este proceso continua hasta que el condensado alcanza la saturación máxima en el punto 3. A partir de este punto, la reducción isotérmica de la presión permite a las moléculas pesadas su normal vaporización. Es de hacer notar que el líquido condensado normalmente no alcanza la saturación crítica en el yacimiento y por tanto no puede ser producido. Normalmente, la relación gas-condensado es mayor que 3200 PCN/BN, la gravedad API en el rango de 40° a 60° y el color del condensado a condiciones de tanque es amarillo-claro (Ahmed, 2001), (Rojas, 2003).

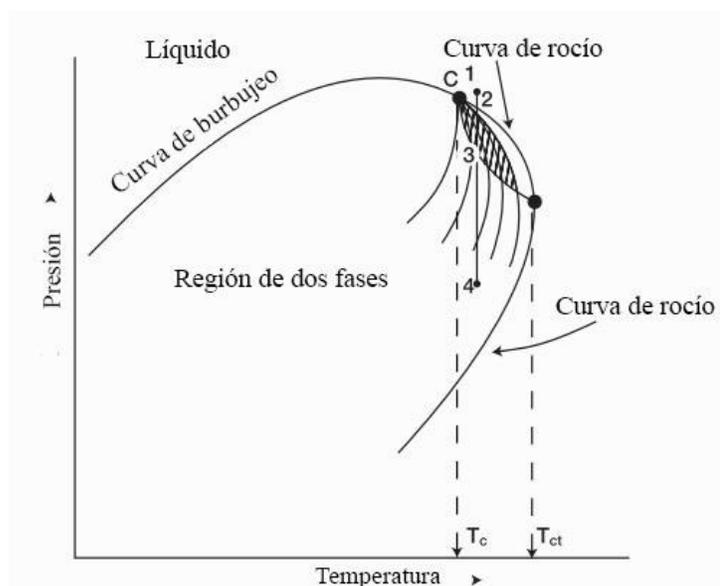


Figura 6. Diagrama de fases de un gas condensado.

Fuente: (Ahmed T, 2001).

### 1.2.5.1 Presión de rocío retrograda

La importancia del conocimiento de la presión de rocío reside en que a presiones por debajo de ella comienza a ocurrir condensación retrograda de líquido.

La presión de rocío depende de la composición de la mezcla y se puede caracterizar aproximadamente a través de la RGL y de la gravedad API del condensado.

Se ha demostrado experimentalmente que la presión de rocío se ve afectada de la siguiente manera:

- A medida que incrementa la temperatura, aumenta la presión de rocío.
- A medida que la gravedad API del condensado aumenta, disminuye la  $P_{roc}$ .
- A medida que incrementa la RGL, disminuye la  $P_{roc}$ .

### **1.2.5.2 Condensación y vaporización**

Cuando en un yacimiento de gas condensado se produce una reducción isotérmica de la presión y cae por debajo de la curva de rocío, ocurre condensación de las fracciones pesadas e intermedias del gas, como se explicó anteriormente. Estas fracciones se depositan como líquido en los canales porosos más pequeños de la roca; por lo que no logran fluir ya que no alcanzan la saturación crítica del líquido. El efecto dañino de permitir condensación retrógrada está dado por el depósito de las fracciones que tienen mayor valor comercial, por lo que el fluido que se produce se empobrece en tales fracciones.

La declinación de la presión produce una rápida condensación de líquido que alcanza un máximo. Una vez que se alcanza la condensación retrograda máxima, ocurre revaporización del condensado al seguir disminuyendo la presión. Como consecuencia se produce una disminución de la RGL y un incremento de la gravedad específica del gas condensado producido. El condensado retrogrado no se revaporiza totalmente aunque se alcancen bajas presiones de agotamiento; esto se debe a que solo se alcanza la presión de rocío normal a presiones por debajo de la atmosférica (vacío).

El condensado retrogrado atrapado en un yacimiento sin empuje hidráulico no puede recuperarse sino por revaporización inyectando gas natural a alta presión.

## 2. Propiedades de los hidrocarburos

### 2.1. Mezclas de petróleo

#### 2.1.1. Densidad del petróleo ( $\rho_o$ ).

La densidad del petróleo se define como la relación de la masa y el volumen. Se expresa en  $lbm/ft^3$ , y viene dada por:

$$\rho_o = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 1}$$

#### 2.1.2. Gravedad específica del petróleo ( $\gamma_o$ ).

La densidad relativa del petróleo ( $\gamma_o$ ) se define como la relación de densidad del líquido a la densidad del agua a las mismas condiciones de presión y temperatura estándar (las condiciones estándar usualmente son 14,7 lpca y 60°F). La densidad relativa es adimensional, y está dada por:

$$\gamma_o = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad \text{Ec. 2}$$

#### 2.1.3. Gravedad API ( $\gamma_{API}$ )

La gravedad del petróleo ( $\gamma_{API}$ ) en grados API es usada para clasificar los petróleos crudos sobre la base de la siguiente relación:

$$\gamma_{API} = \frac{141,5}{\gamma_o} - 131,5 \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

$\gamma_o$  = Densidad relativa del petróleo

2.1.4. *Compresibilidad del petróleo (Co).*

En general, la compresibilidad isotérmica de un fluido,  $c$  en  $\text{lpc}^{-1}$ , se define como el cambio fraccional en volumen cuando la presión cambia a temperatura constante, esto es:

$$c = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $V$  se refiere al volumen,  $P$  a la presión y el subíndice  $T$  a temperatura.

2.1.5. *Presión de burbuja (Pb).*

La presión de burbujeo ( $P_b$ ) o presión de saturación ( $P_s$ ) de un sistema de hidrocarburos se puede definir como la presión más alta a la cual emerge o se libera del petróleo la primera burbuja de gas (De Ferrer, 2009).

2.1.6. *Factor volumétrico de formación del petróleo (Bo).*

El factor volumétrico de formación del petróleo, se define como el número de barriles ocupados en el yacimiento, a las condiciones predominantes de presión y temperatura, por un barril normal de petróleo más su gas disuelto (Dake, 1978).

En síntesis, es el número de barriles de petróleo más su gas en solución en el yacimiento, necesarios para obtener un barril de petróleo en superficie a condiciones normales. Está dado por:

$$\beta_o [BY / BN] = \frac{V_o}{(V_o)_{sc}} \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

$V_o$ = Volumen de petróleo más gas en solución a condiciones de yacimiento, BY.

$(V_o)_{sc}$ = Volumen de petróleo en superficie a condiciones normales, BN.

En la figura 7 se puede observar como al reducir la presión; el volumen de líquido en el yacimiento sufre una expansión , en un momento luego de esta

disminución; se va alcanzar la presión de burbujeo, en ese punto se sigue disminuyendo la presión al mismo tiempo de esto el petróleo con gas en solución sigue expandiéndose, es decir, que en teoría el petróleo debería de seguir aumentando su volumen, pero adicionalmente habrá una cantidad de gas disuelto que se está liberando de ese petróleo y como el gas es más compresible que el petróleo este ocupa más volumen (De Ferrer, 2009).

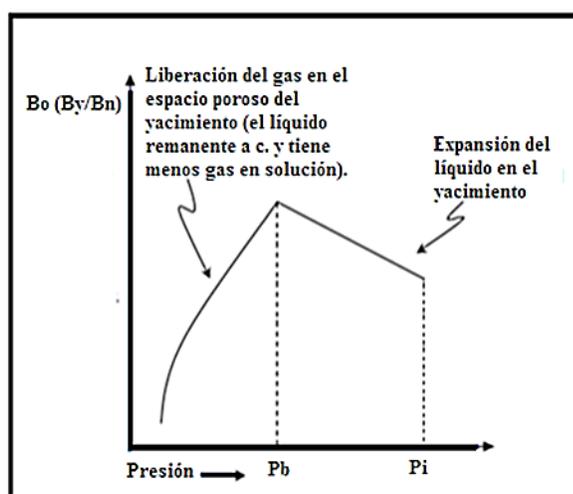


Figura 7. Factor volumétrico de formación del petróleo versus presión.

### 2.1.7. Factor volumétrico total o bifásico (Bt).

El factor volumétrico total, se define como el volumen de una mezcla bifásica (gas-petróleo) a elevada presión y temperatura dividida por el volumen de petróleo a condiciones normales resultante cuando la mezcla bifásica es llevada a condiciones de superficie (Whitson y Brulé, 2000). Está dado por:

$$\beta_t [BY / BN] = \frac{V_o + V_g}{(V_o)_{sc}} \quad \text{Ec. 6}$$

En la figura 8 se puede apreciar que la relación de solubilidad del gas en el petróleo se mantiene constante para presiones por encima de la presión de burbujeo y por tanto:  $\beta_t = \beta_o$ , esta curva que representa el  $\beta_t$  muestra una tendencia lineal con pendiente casi nula (región monofásica), al disminuir la presión desde la presión

inicial a la presión de burbujeo. Una vez que se alcanza la  $P_b$ , el comportamiento de la curva muestra un ascenso (región bifásica), que indica que el gas liberado ocupa mayor volumen que el petróleo en el yacimiento, lo que genera un incremento en el  $\beta_t$ .

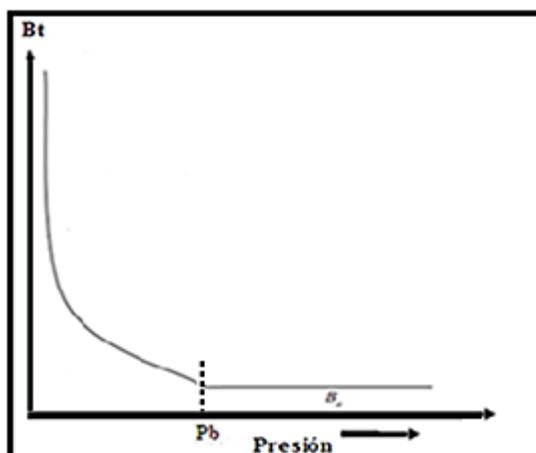


Figura 8. Factor volumétrico bifásico o total.

Fuente:(Ramírez, 2015)

### 2.1.8. Relación gas-petróleo en solución ( $R_s$ ).

La relación gas-petróleo en solución, se define como el número de pies cúbicos estándar de gas que se disolverán en un barril normal de petróleo cuando ambos son llevados al yacimiento a las condiciones predominantes de presión y temperatura (Dake, 1978). Está dado por:

$$R_s[PCN/BN] = \frac{V_g}{V_o} \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

$V_g$ = Volumen de gas producido en superficie a condiciones normales, PCN.

$V_o$  = Volumen de petróleo en superficie a condiciones normales, BN.

En la figura 9 se observa que el  $R_s$  permanece constante antes de la presión de burbujeo, debido a que el gas todavía no se ha liberado. Una vez que alcanza la presión de burbujeo el gas en solución comienza a liberarse, resultando en una disminución del  $R_s$ .

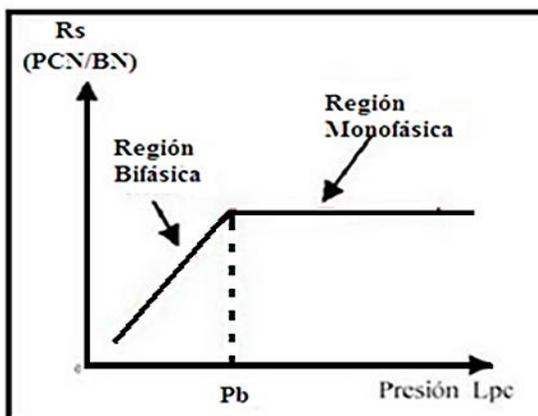


Figura 9. Relación gas-petróleo en solución versus presión.

Fuente:(McCain, 1990).

### 2.1.9. Viscosidad del petróleo ( $\mu$ ).

De acuerdo con Whitson y Brulé (2000), en cálculos de ingeniería se utilizan dos tipos de viscosidad; viscosidad dinámica,  $\mu$ , y viscosidad cinemática  $\nu$ . La definición de  $\mu$  para fluidos Newtonianos (los cuales corresponden a la mayoría de mezclas de petróleo) es:

$$\mu = \frac{\tau g_c}{du/dy} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

$\tau$  = Esfuerzo cortante por unidad de área en el plano cortante paralelo a la dirección de flujo.

$du/dy$  = Gradiente de velocidad perpendicular al plano de corte.

$g_c$  = Unidad de conversión de masa a fuerza.

La unidad de la viscosidad dinámica es centipoise (cp).

## 2.2. Mezclas de gases

### 2.2.1. Peso molecular aparente ( $M_g$ ).

Si se conoce la composición de la mezcla, el peso molecular de una mezcla de hidrocarburos en estado gaseoso se puede determinar de la siguiente forma:

a. Gas natural

$$M_g = \sum_1^n M_i Y_i \quad \text{Ec. 9}$$

b. Gas condensado

$$M_{gc} = \sum_1^n M_i Z_i \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

$M_g, M_{gc}$  = Peso molecular del gas natural y gas condensado, respectivamente, lbm/lbmol.

$M_i$  = Peso molecular del componente i en la mezcla, lbm/lbmol.

$Y_i, Z_i$  = Fracción molar del componente i en el gas natural y gas condensado, respectivamente.

$n$  = Número de componentes en cada mezcla.

### 2.2.2. Gravedad específica del gas ( $\gamma_g$ ).

La gravedad específica del gas condensado (aire=1) se calcula a partir de  $M_{gc}$ .

$$\gamma_{gc} = \frac{M_{gc}}{28,96} \quad \text{Ec. 11}$$

### 2.2.3. Presión de rocío ( $P_{roc}$ ).

La presión de rocío  $P_{roc}$  o presión de saturación  $P_s$  de una mezcla de gases se puede definir como la presión más alta a la cual se libera del gas la primera gota de petróleo (De Ferrer, 2009).

2.2.4. *Factor de compresibilidad del gas ( $Z_g$ ).*

Como se muestra en la ecuación 12, el factor de compresibilidad ( $Z_g$ ) es un factor de corrección introducido en la ecuación general de los gases ideales.

$$PV = Z_g NRT \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde:

$P$  = Presión absoluta, lpca

$T$  = Temperatura absoluta, °R

$V$  = Volumen, pies<sup>3</sup>

$N$  = Número de moles

$Z_g$  = Factor de compresibilidad, adim

$R$  = Cte. universal de los gases, 10,73 (lpca x pie<sup>3</sup>)/(lbmol x °R)

Experimentalmente, este factor se puede obtener dividiendo el volumen real de  $n$  moles de un gas a  $P$  y  $T$  por el volumen ideal ocupado por la misma masa de gas a iguales condiciones de  $P$  y  $T$ .

$$Z = \frac{V_{real}}{V_{ideal}} \quad \text{Ec. 13}$$

2.2.5. *Factor de compresibilidad bifásico ( $Z_{2f}$ ).*

El factor de compresibilidad bifásico ( $Z_{2f}$ ) es un pseudo factor de compresibilidad de una mezcla gas-liquido considerando que el líquido se comporta como un gas (Rojas, 2003).

Existen varios métodos para determinar  $Z_{2f}$ , a continuación se detalla el método basado en pruebas de laboratorio:

Partiendo de las condiciones iniciales ( $P_i = Proc, N_i, GCOES$ ), se alcanza la presión  $P$  retirando una cierta cantidad de gas ( $N_p, G_p$ ), manteniendo el volumen y la temperatura constante como se observa en la figura 10.

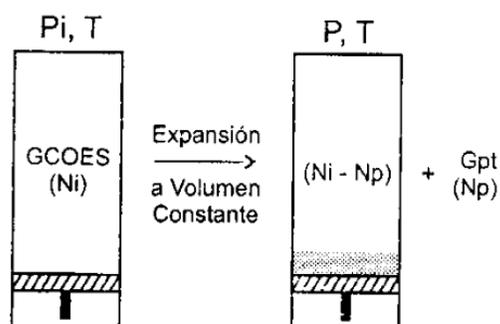


Figura 10. Agotamiento de presión isotérmico e isovolumétrico en una celda PVT.

Fuente: (Rojas, 2003).

Al mismo tiempo, de la ecuación de estado de los gases reales se tiene:

$$Z2_f = \frac{P V_i}{(N_i - N_p)RT} \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

$(N_i - N_p)$  = Moles remanentes de fluido en la celda

$N_i$  = Moles iniciales en la celda

$N_p$  = Moles de gas producido acumulados

La ecuación 14 puede ser expresada en una forma más conveniente reemplazando los moles de gas,  $N_i$  y  $N_p$ , con sus volúmenes equivalentes de gas, o:

$$Z2_f = \frac{Z_{gi}P}{P_i(1 - \frac{G_{pt}}{GCOES})} \quad \text{Ec.15}$$

Dónde:

$Z_{gi}$  = Factor de compresibilidad del gas en el punto de rocío, adim.

$P_i$  = Presión de rocío, lpca

$P$  = Presión del yacimiento, lpca

$GCOES$  = Gas condensado original en sitio, PCN

$G_{pt}$  = Gas producido acumulado a la presión  $P$ , PCN

2.2.6. *Factor volumétrico de formación del gas (Bg).*

El factor volumétrico de formación del gas, se define como el volumen en barriles que un pie cubico estándar de gas ocupará como gas libre en el yacimiento a las condiciones predominantes de presión y temperatura del yacimiento (Dake, 1978).

En síntesis, es el número de pies cúbicos de gas libre en el yacimiento, necesarios para obtener un pie cubico de gas en superficie a condiciones normales.

De acuerdo con las unidades de trabajo, está dado por:

$$\beta_g[PCY/PCN] = 0,02829 \frac{Z_g T}{P} \quad \text{Ec. 16}$$

$$\beta_g[BY/BN] = 0,00504 \frac{Z_g T}{P} \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

$Z_g$  = Factor de compresibilidad del gas a T y P, adim

$T$  = Temperatura absoluta, °R

$P$  = Presión absoluta, lpca

En la figura 11 se puede observar el comportamiento típico del factor volumétrico de formación del gas; al alcanzar el punto de presión de saturación en el yacimiento, el Bg sufre un incremento con la disminución de la presión.

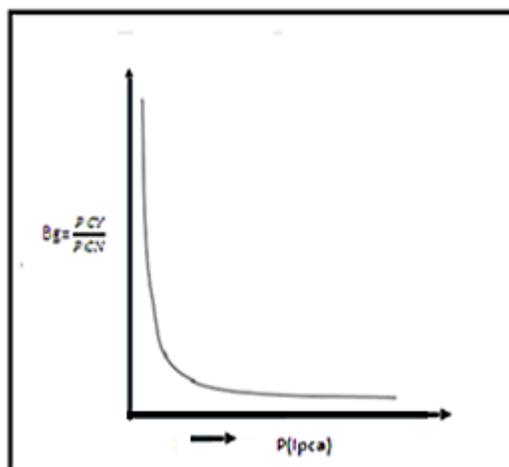


Figura 11. Factor volumétrico de formación del gas versus presión.

### 2.2.7. Densidad del gas ( $\rho_g$ ).

De acuerdo con Rojas (2003), la densidad de mezclas en fase gaseosa (gas natural, gas separador, gas condensado a  $P \geq P_{roc}$ , etc) se puede determinar aplicando la ley general de los gases reales (ec. 12). Como se muestra en la ec. 18.

$$\rho_g = \frac{PM_g}{Z_gRT} \quad \text{Ec. 18}$$

Dónde:

$\rho_g$  = Densidad de la mezcla gaseosa,  $lbm/ft^3$

$P$  = Presión absoluta, lpca

$M_g$  = Peso molecular del gas,  $lbm/lbmol$

$Z_g$  = Factor de compresibilidad, adim

$R = 10,73$

$T$  = Temperatura absoluta, °R

Para determinar la densidad del gas condensado ( $\rho_{gc}$ , fase gaseosa) se usa la misma ec. 18 reemplazando  $M_g$  y  $Z_g$  por  $M_{gc}$  y  $Z_{gc}$ .

### 3. Estudios experimentales (PVT)

Una vez determinado el estado del fluido que se encuentra en el yacimiento, se procede a realizar los estudios en el laboratorio que permitan generar de forma fiable las propiedades del fluido y su composición para su uso en evaluación y simulación de yacimientos.

De acuerdo lo expuesto por Rojas (2003), los experimentos PVT consisten en simular en el laboratorio el agotamiento de presión de un yacimiento volumétrico e isotérmico, y están estrechamente relacionados con dos procesos termodinámicos diferentes que ocurren simultáneamente en el campo. Estos procesos se refieren a la liberación instantánea de los fluidos (petróleo y gas) en el pozo y en la superficie durante la producción, y la liberación diferencial de los fluidos en el yacimiento durante la declinación de presión.

Por definición, liberación diferencial es aquella donde la composición total del fluido varía durante el proceso. En este caso el gas separado es removido parcial o totalmente del contacto con el líquido. Mientras tanto, en la liberación instantánea todo el gas permanece en contacto con el líquido y en agitación permanente, lo que significa que la composición total del fluido permanece constante durante el agotamiento de presión.

Para ahondar en el proceso de separación gas-líquido en el yacimiento y en las instalaciones de superficie durante la producción de hidrocarburos, se muestra en la figura 12 la transición de fases durante el agotamiento, para el caso de un yacimiento de petróleo negro subsaturado. En la zona A, lejana al pozo, donde la presión está aún por encima de la presión de burbuja, el petróleo se expande como un líquido monofásico y no ocurre separación gas-líquido. La presión en la zona B está justo por debajo del punto de burbuja y el volumen de gas liberado es muy pequeño para permitir su movilización; bajo estas condiciones el proceso de liberación es tipo instantánea. En la zona C, el gas liberado fluye hacia el pozo productor, pero de forma segregada respecto al petróleo debido a las fuerzas de gravedad y superficiales; bajo estas condiciones el proceso de liberación es tipo diferencial.

No obstante, en el pozo y en los separadores, se considera que ambas fases fluyen en forma conjunta y en total confinamiento, manteniendo el equilibrio de la mezcla; en estas condiciones se asume que el proceso de liberación es tipo instantánea. Los procesos de yacimiento descritos son simulados en el laboratorio mediante las pruebas de liberación instantánea, liberación diferencial, y agotamiento a volumen constante (para el caso de gas condensado).

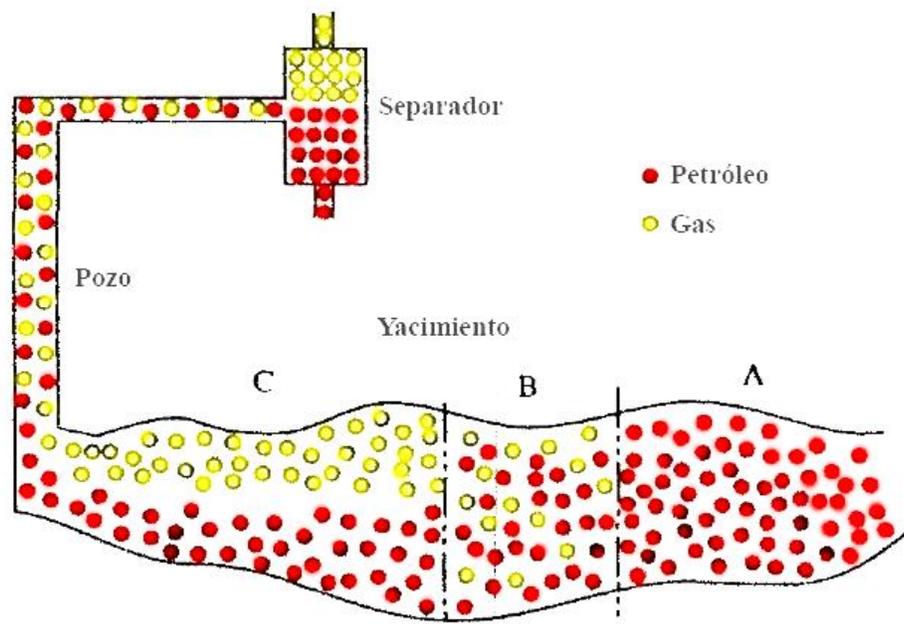


Figura 12. Transición de fases en un yacimiento de petróleo subsaturado.

Fuente: (Danesh, 1998).

A continuación se describirán las principales técnicas para la toma de muestras de fluidos del yacimiento.

### 3.1. Muestreo

El primer paso para obtener una data PVT fiable, con la consecuente caracterización de los fluidos, radica en adquirir suficientes volúmenes de muestras de fluidos representativas del yacimiento (Lawrence, Chorneyko, Smith, y

Nagarajan, 2008). En este sentido, el objetivo de cualquier programa de muestreo consiste en tomar una muestra que represente el fluido en el yacimiento.

Al respecto, y de acuerdo con lo expuesto por Rojas (2003), las muestras deben ser tomadas en los primeros días de producción antes de que ocurra una caída significativa de presión del yacimiento, o al menos cuando la presión sea mayor o igual a la de saturación de la mezcla de hidrocarburos. Una vez que la presión haya declinado por debajo de la presión de saturación, ya no es posible obtener muestras que representen el fluido original del yacimiento. Si la muestra se toma cuando la presión del yacimiento es inferior a la presión de saturación, ocurrirá la formación de una segunda fase en el yacimiento y la composición química de la mezcla cambiará.

### *3.1.1. Tipos de muestreo.*

Comúnmente se utilizan tres métodos para tomar muestras de fluidos de yacimientos:

- Muestreo de fondo.
- Muestreo de separador (recombinación).
- Muestreo de cabezal.

#### **3.1.1.1 Muestreo de fondo.**

Esta técnica consiste en capturar el fluido a condiciones de yacimiento antes de que alcance la superficie. Para lograr esto, se hace uso de herramientas especiales (muestreadores) que contienen una cámara para acumular los fluidos con una capacidad entre 600 – 700 cc. Las principales herramientas utilizadas se describen a continuación:

a) *Herramienta Wireline Formation Tester (WFT)*, para hacer uso de esta herramienta la cámara se baja con guaya fina (cable eléctrico) y posteriormente se abre desde superficie a través de una señal eléctrica. Es de hacer notar que esta herramienta posee una cámara de compensación que mantiene la presión constante. Algunas poseen incluso un sistema de compensación de temperatura para ser usadas

en yacimientos con problemas de floculación de asfaltenos. En la figura 13 se muestra la configuración de la herramienta WFT (Rojas, 2003).

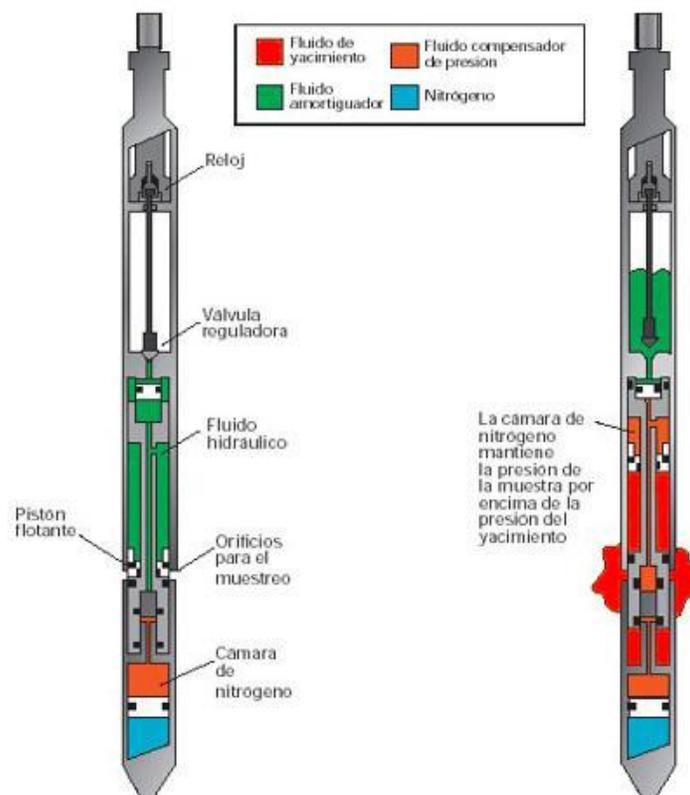


Figura 13. Herramienta WFT compensada antes y después de tomar la muestra.

Fuente: (Rojas, 2003).

b) *Herramienta tipo Drill Stem Testing (DST)*, esta herramienta se baja con la sarta de perforación o completación, en una de sus partes tiene incorporado un cargador o almacenador (Rojas, 2003). Además, contiene puertos que abren y capturan la muestra de fluido. El método de activación normalmente incluye presión en el anular y señales acústicas. Regularmente las muestras son tomadas sólo para la identificación del fluido y determinar las propiedades del líquido de tanque (petróleo muerto) debido a problemas de contaminación con fluidos en el fondo del pozo. En la figura 14 se muestra la configuración de la herramienta DST.

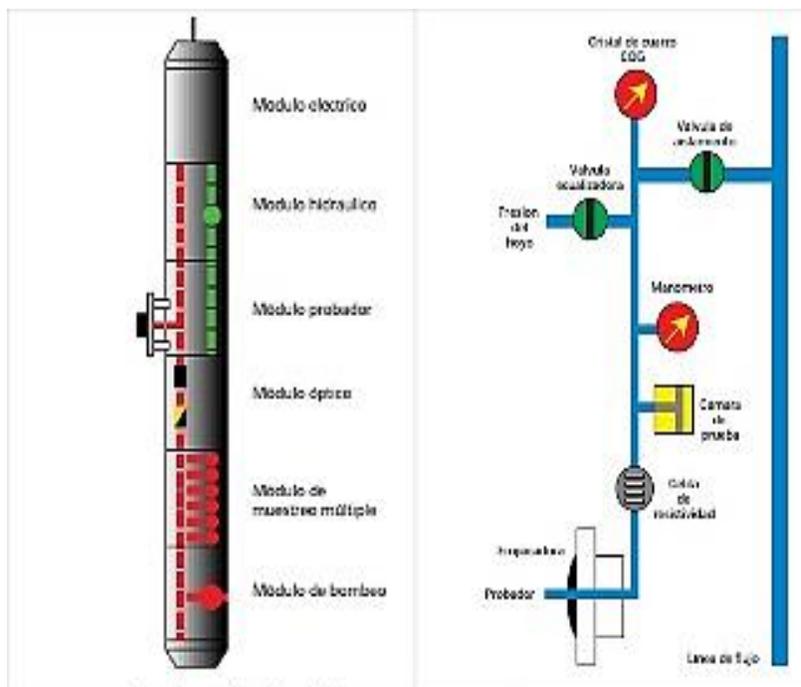


Figura 14. Herramienta DST.

Fuente: (Rojas, 2003).

Se hace necesario resaltar que en el caso de un gas condensado obtener una muestra de fondo representativa del yacimiento es considerablemente más difícil que para un yacimiento convencional de petróleo negro. La principal dificultad radica en la formación de líquido condensado a partir del fluido del yacimiento durante el proceso de muestreo, lo cual puede ocasionar que no se recuperen volúmenes de líquido y gas en proporciones representativas, y en consecuencia se calculará una composición errónea del fluido.

Debido a la posibilidad de composiciones erróneas y también a los volúmenes limitados obtenibles, el muestreo de fondo es rara vez implementado en yacimientos de gas condensado. En su lugar, se aplican técnicas de muestreo en superficie y las muestras son obtenidas solo después de largos periodos de flujo estabilizado (Ahmed, 2001).

En la tabla 2 se muestran las ventajas y desventajas del muestreo de fondo.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del muestreo de fondo.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere de medición de tasas de flujo.</li> <li>• Excelentes para crudos subsaturados.</li> <li>• Permite tomar muestras monofásicas de crudos con problemas de floculación de asfaltenos o cristalización de parafinas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No toma muestras representativas cuando <math>P_{wf} &lt; P_b</math>.</li> <li>• No sirve para yacimientos de gas condensado.</li> <li>• Volumen de muestra pequeño.</li> <li>• Muestreador costoso y posibles problemas mecánicos.</li> <li>• Pueden ocurrir fugas de gas o liquido durante la sacada de la muestra a superficie.</li> <li>• No se recomienda cuando el pozo tiene una columna grande de agua.</li> <li>• Contaminación de la muestra con fluidos extraños.</li> </ul>

Fuente: (Rojas, 2003).

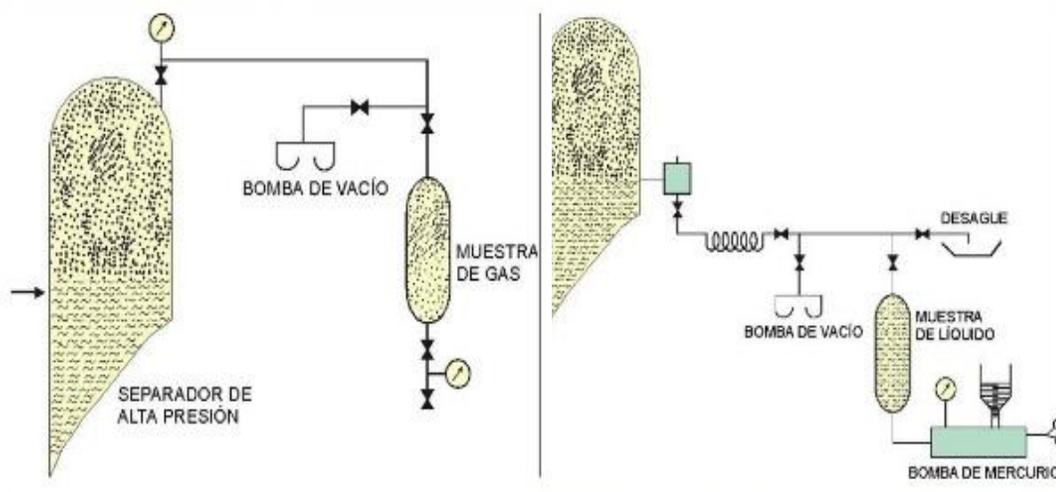
### 3.1.1.2 Muestreo de separador.

Esta técnica consiste en obtener la muestra mediante la recombinación física del líquido y el gas tomados simultáneamente del separador de alta presión, en una proporción equivalente a la RGL del separador, medida en campo durante la prueba de producción. El pozo elegido para el muestreo necesita producir a una tasa de flujo estabilizada por un largo periodo de tiempo.

Según Lawrence et al. (2008), tres requisitos operacionales deben ser cumplidos para asegurar que las muestras recombinadas del separador sean representativas del yacimiento: (a) la RGL producida debe ser representativa de la RGL real del yacimiento, (b) la relación debe ser determinada de manera precisa, y (c) los fluidos producidos deben ser recombinados apropiadamente en el laboratorio.

Para tal efecto, como se muestra en la figura 15, para el muestreo de gas se recomienda llenar un cilindro evacuado y para el muestreo de liquido se recomienda

usar la técnica de desplazamiento (la muestra de líquido desplaza al fluido del cilindro) (Rojas, 2003).



(a)

(b)

Figura 15. (a) Toma de muestra de gas en el separador y (b) toma de muestra de líquido en el separador.

Fuente: (Rojas, 2003).

En la tabla 3 se muestran las ventajas y desventajas del muestreo de separador.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del muestreo de separador.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es válido para casi todos los tipos de fluidos.</li> <li>• Recomendado para yacimientos de gas condensado.</li> <li>• Menos costoso y riesgoso que el de fondo.</li> <li>• Permite tomar muestras de gran volumen.</li> <li>• Las muestras son de fácil manejo en el laboratorio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los resultados dependen de la exactitud con que se mida la RGL.</li> <li>• Un error de 5% en las tasas de flujo produce errores del orden de 150 lpc en Pb.</li> <li>• Resultados erróneos cuando en el separador se tiene problemas de espuma, separación ineficiente o nivel inadecuado de la interfase gas-líquido.</li> </ul>

Fuente: (Rojas, 2003).

### 3.1.1.3 Muestreo de cabezal.

En este método la muestra de fluido puede ser tomada directamente del cabezal del pozo. La muestra se hace fluir a un cilindro usando la técnica de desplazamiento. El fluido necesita estar en estado monofásico a las condiciones fluyentes del cabezal.

Normalmente, la muestra requiere ser tomada a una presión al menos 100 lpc por encima de la presión de saturación para ser considerada válida. En la tabla 4 se muestran las ventajas y desventajas del muestreo de cabezal.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del muestreo de cabezal.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede usar en yacimientos subsaturados de petróleo o gas condensado.</li> <li>• Es rápido y de bajo costo.</li> <li>• No requiere de la medición de tasas de flujo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es difícil tomar una muestra representativa por la agitación de los fluidos.</li> <li>• No se debe usar si hay flujo bifásico en el cabezal.</li> </ul>

Fuente: (Rojas, 2003).

### 3.1.2. Representatividad de las muestras.

Consiste en chequear si la muestra es representativa del fluido original existente en el yacimiento. Con este fin se debe comprobar que:

- $T_{lab} = T_{yac}$ . La temperatura a la que fue realizada la prueba en el laboratorio debe ser igual a la del yacimiento o a la de la zona (profundidad) donde se tomó la muestra.
- La relación gas líquido de la muestra recombinada (PCN/BN) debe ser similar a la inicial de las primeras pruebas de producción del yacimiento o de la zona donde se tomó la muestra.
- La prueba expansión a composición constante (CCE) debe mostrar punto de rocío (en caso de muestra de gas condensado), si muestra punto de burbujeo,

el yacimiento es de petróleo volátil o la muestra estaba contaminada con líquido y no es representativa.

- El pozo produjo estabilizadamente antes de la toma de la muestra.
- La presión y la temperatura del separador debieron permanecer constantes durante las tomas de las muestras de gas y líquido.

### 3.2. Estudios convencionales experimentales para fluidos de yacimiento (PVT)

Los estudios convencionales experimentales para cada tipo de fluidos de yacimiento generalmente son los que se muestran en la figura 16.

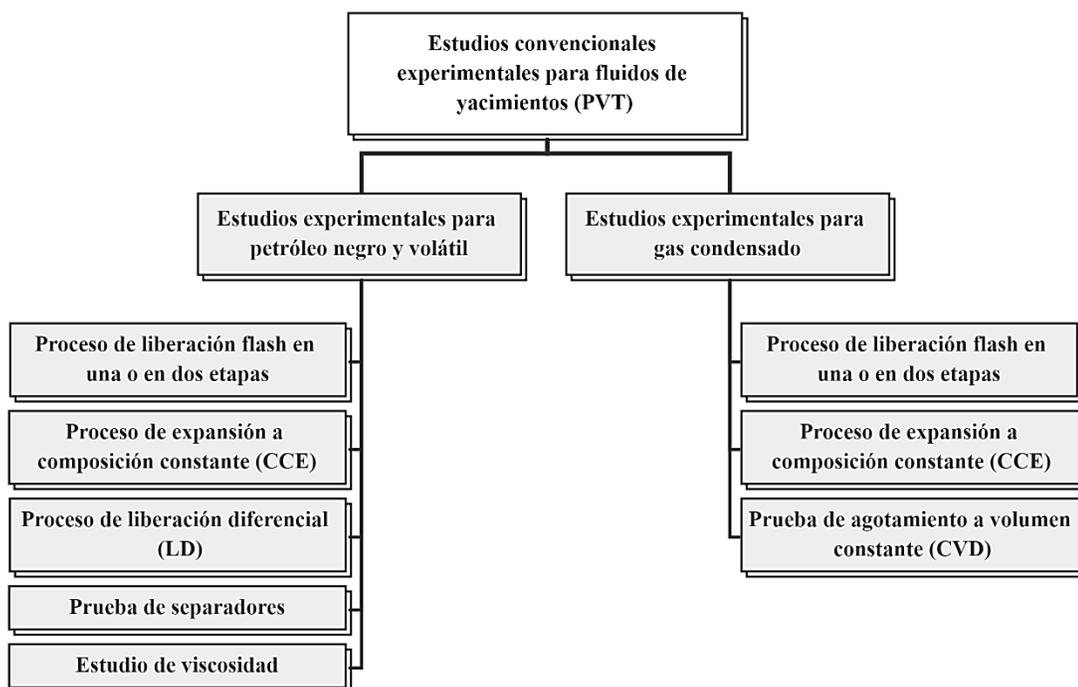


Figura 16. Estudios PVT convencionales de acuerdo con el tipo de fluido.

Es importante resaltar que los estudios PVT deben ser validados, lo cual incluye desde la revisión de la representatividad de la muestra (véase apartado 3.1.2 en este Capítulo) hasta la comprobación que no hay errores de consistencia en los resultados de laboratorio.

Un análisis PVT debe ser representativo y consistente para poder ser utilizado en estudios integrados de yacimientos. Si un análisis PVT es consistente pero no representativo puede ser usado en la elaboración de correlaciones y en ajustes de ecuaciones de estado (Rojas, 2003).

Un resumen de las pruebas de consistencia que se deben realizar para validar un PVT de petróleo negro y/o gas condensado se muestra en las figuras 17 y 18.

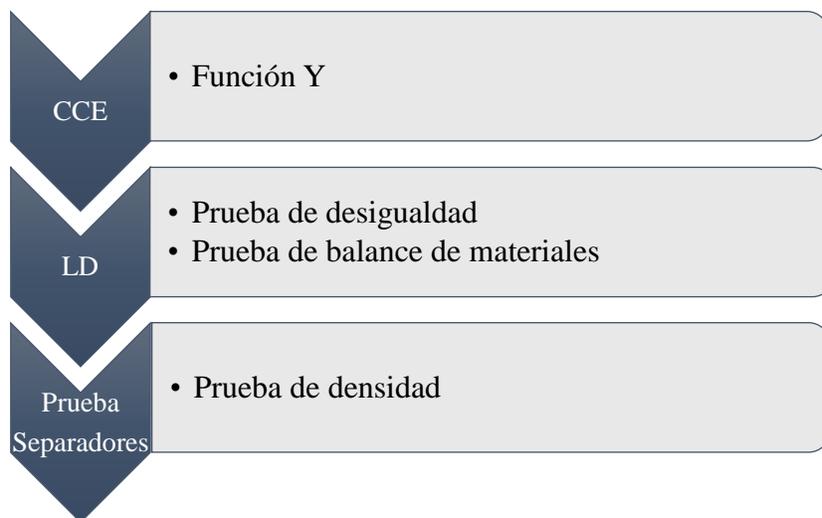
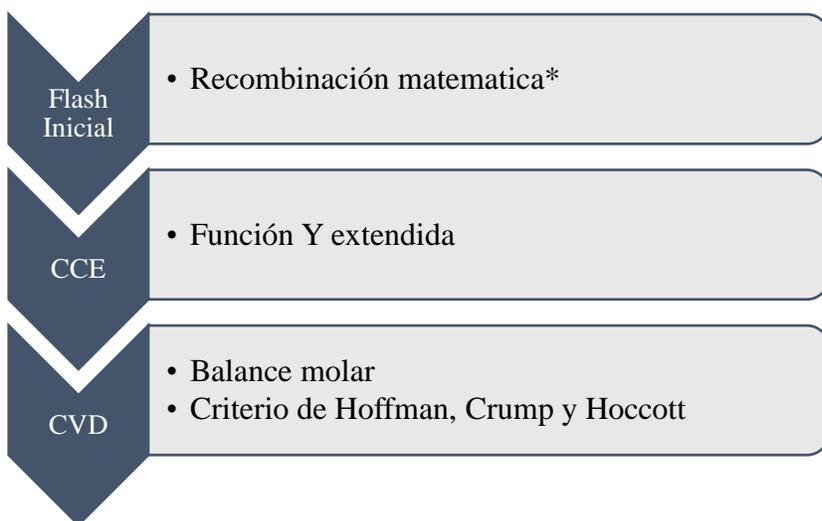


Figura 17. Pruebas PVT convencionales y métodos de validación para petróleo negro y volátil.



\*Aplica sólo para muestras tomadas en el separador

Figura 18. Pruebas PVT convencionales y métodos de validación para gas condensado.

En este mismo contexto, se presenta a continuación una descripción de las pruebas PVT convencionales, así como los métodos de validación correspondientes para cada caso.

### 3.2.1. Prueba de liberación instantánea (*flash*) en una etapa.

La liberación instantánea se lleva a cabo en todas las muestras de fluidos de yacimiento y su importancia radica en que permite determinar la composición del fluido original del yacimiento, así como algunas de sus propiedades. La muestra monofásica (gas o líquido) es transferida a una celda PVT a la presión y temperatura del yacimiento, o a una presión por encima de la presión de rocío (A). Después de transferida la muestra, se debe esperar que el sistema se estabilice y alcance el equilibrio; además, la presión en la celda debe permanecer constante.

Seguidamente, una alícuota de la muestra es expelida hacia un recipiente de vidrio (vial) que se encuentra a condiciones atmosféricas de presión y temperatura (B). Como resultado de esta reducción brusca de presión se obtienen dos fases estabilizadas en el vial, líquido y gas. Luego, se procede a determinar el volumen del líquido, y el gas es enviado a un gasómetro, instrumento que permite la medición de su volumen. Posteriormente, las muestras son analizadas individualmente aplicando métodos de cromatografía para determinar su composición química.

El líquido se pesa y analiza para determinar su densidad y peso molecular. Esta prueba permite calcular: (a) la relación gas líquido (RGL), (b) la densidad a la presión de carga, (c) la gravedad API del líquido producido, (d) el factor volumétrico de formación ( $\beta_g$  o  $\beta_o$ ), y (e) la composición del fluido original del yacimiento. En la figura 19 se puede observar el proceso de liberación instantánea en una etapa para un gas condensado.

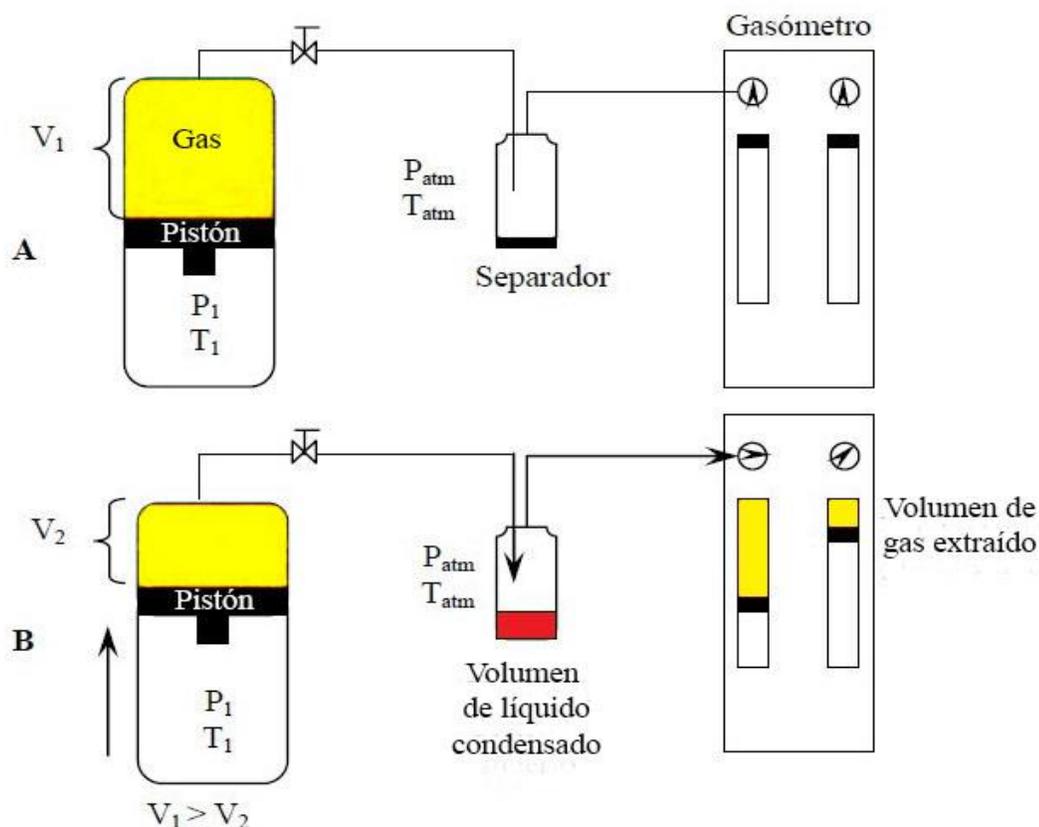


Figura 19. Liberación instantánea (flash) en una etapa para un gas condensado.

Fuente: (Gimenez y Salas, 2007).

En el caso de muestras recombinadas en el laboratorio (muestras de separador) se les determina también su composición total. Sin embargo, esta debe ser comparada con la composición de la mezcla gas-líquido obtenida matemáticamente con base a los datos del separador y de acuerdo al procedimiento que se explica a continuación.

Recombinación matemática:

En esta prueba se recombina matemáticamente por medio de un balance molar las muestras de gas y líquido tomadas en el separador a una presión P y T (Rojas, 2003).

Partiendo de la figura 20 se tiene,

Balance molar por fase:

$$N_{gc} = N_g + N_l$$

Ec. 19

$$N_g = RGL_{sep}/379,4 \quad \text{Ec. 20}$$

$$N_l = \rho_{lsep}/M_l \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

$N_{gc}$  = Moles de gas condensado, lbmol/Blsep

$N_l$  = Moles de líquido, lbmol/Blsep

$N_g$  = Moles de gas, lbmol/Blsep

$RGL_{sep}$  = Relación gas-líquido, PCN/Blsep

$\rho_{lsep}$  = Densidad del líquido de separador a P y T sep, lbm/Blsep

$M_l$  = Peso molecular del líquido del separador, lbm/lbmol

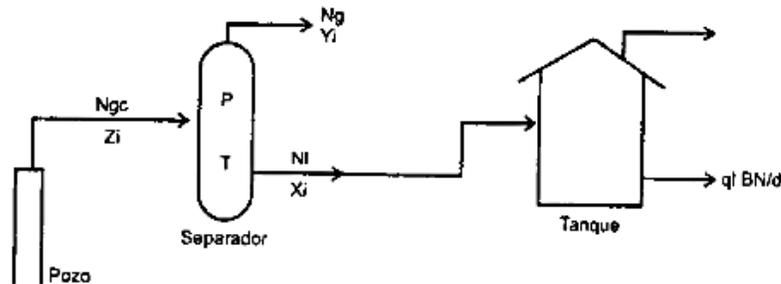


Figura 20. Arreglo de separador y tanque de prueba.

Fuente: (Rojas, 2003).

Balance molar por componente,

$$ZiN_{gc} = YiN_g + XiN_l \quad \text{Ec. 22}$$

Introduciendo las ecs. 19 a 21 en la ec. 22 y despejando Zi de obtiene,

$$Zi = \frac{YiRGL_{sep}/379,4 + Xi\rho_{lsep}/M_l}{RGL_{sep}/379,4 + \rho_{lsep}/M_l} \quad \text{Ec. 23}$$

Dónde:

$Zi$  = Composición del gas condensado, frac. molar

$Xi$  = Composición del líquido del separador, frac. molar

$Y_i$  = Composición del gas de separador, frac. molar

$RGL_{sep}$  PCN/Blsep se obtiene de la ecuación 10:

$$RGL_{sep}[PCN/Blsep] = \frac{RGL(PCN/BN)}{Bl(Blsep/BN)} \quad \text{Ec. 24}$$

Dónde:

$RGL_{sep}$  = Relación gas-condensado (separador). PCN/Blsep

$Bl$  = Factor volumétrico del líquido a condiciones del separador, Blsep/BN

La  $RGL PCN/BN$  y  $Bl Blsep/BN$  se obtienen en el campo durante la toma de las muestras.

La  $\rho_{lsep}$  se determina por Standing y Katz. Luego de determinar los  $Zi_{cal}$  por la ecuación 23 se comparan con los valores experimentales ( $Zi_{exp}$ ) y se debe cumplir:

$$\text{Metano: } \left| \frac{Zc1exp - Zc1calc}{Zc1exp} \right| * 100 \leq 2\%$$

$$C_7 +: \left| \frac{Zc7+exp - Zc7+calc}{Zc7+exp} \right| * 100 \leq 5\%$$

### 3.2.2. Prueba de expansión a composición constante (CCE).

El procedimiento operacional para una prueba de expansión a composición constante involucra transferir una muestra monofásica de petróleo (o gas condensado) a una celda PVT a una presión ligeramente superior (500-1000 lpc) a la presión del yacimiento, y a una temperatura igual a la temperatura del yacimiento. Seguidamente, el volumen de la celda es aumentado progresivamente a temperatura constante y en etapas mediante el movimiento vertical de un pistón. La expansión en el volumen de la celda provocará una disminución en la presión del sistema, esta presión es registrada.

En cada etapa, el volumen del contenido total de la celda ( $V_t$ ) es medido y registrado. Cuando la presión de la celda alcanza la presión de saturación (presión de burbuja o presión de rocío), se comienza a formar una segunda fase (gas o líquido) y se produce un cambio en la compresibilidad del sistema de hidrocarburos. En este

punto, el volumen de la celda se registra como volumen de saturación ( $V_{sat}$ ), y este valor es la base fundamental contra el cual se comparan los volúmenes totales de hidrocarburos ( $V_t$ ) medidos durante la prueba, como se muestra en la ecuación 25.

$$V_{relativo} = \frac{V_t}{V_{sat}} \quad \text{Ec. 25}$$

A presiones por debajo de la presión de saturación, el volumen total de hidrocarburos en la celda incluirá ambas fases: petróleo y gas. Además, después que el gas comienza a liberarse, la celda es agitada para permitir a la muestra alcanzar el equilibrio.

El experimento de expansión a composición constante para un petróleo negro es mostrado esquemáticamente en la figura 21. De esta prueba se puede determinar los siguientes parámetros: (a) presión de saturación ( $P_s$ ), (b) volumen relativo ( $V_{rel}$ ), (c) densidad del petróleo ( $\rho_o$ ), y (d) compresibilidad del petróleo ( $C_o$ ).

Es de hacer notar que no se remueve materia desde la celda durante el desarrollo de la prueba, en consecuencia la composición total de la mezcla de hidrocarburos permanece constante.

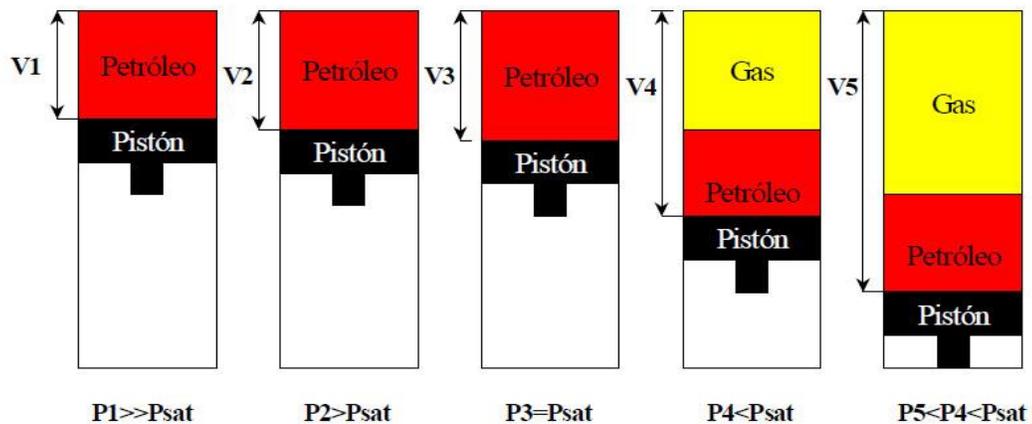


Figura 21. Expansión a composición constante para petróleo negro.

Fuente: (Peralta, 2003).

En la figura 22, se presenta gráficamente el volumen relativo en función de la presión para una muestra de petróleo negro, donde se puede apreciar el punto de

burbuja. Es de hacer notar que el volumen relativo es igual a uno a la presión de saturación. Por encima de la presión de saturación el cambio en el volumen del sistema es insignificante, esto debido a que el petróleo es ligeramente compresible.

Por el contrario, por debajo de la presión de saturación el cambio en volumen del sistema es significativo, esto debido a la alta compresibilidad de la fase gaseosa liberada. En consecuencia, la pendiente de la curva presión-volumen cambia drásticamente con respecto a la pendiente por encima de la presión de saturación. La intersección de las dos curvas es el punto de burbuja.

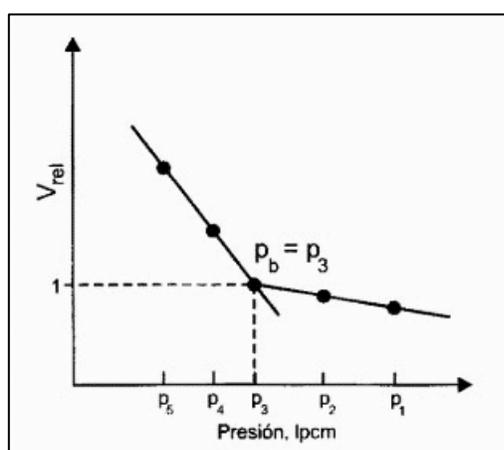


Figura 22. Relación presión-volumen para petróleo negro.

Fuente: (De Ferrer, 2009).

Frecuentemente, las mediciones de volúmenes relativos están sujetas a errores asociados a variaciones en la precisión de la celda (calibración), técnicas experimentales mal ejecutadas o simplemente transcripciones incorrectas al ingresar los valores medidos a herramientas de cálculo. Por ello, se hace necesario validar esta data antes de ser reportada por el laboratorio de análisis.

Con este propósito, se hace uso de un importante parámetro adimensional denominado función  $Y$ . Esta herramienta matemática permite optimizar la medición del punto de burbuja en muestras de petróleo negro y petróleo volátil; es aplicable exclusivamente a presiones por debajo de la presión de burbuja, y está definida como se muestra en la ecuación 26.

$$Y[adim] = \frac{(P_b - P)}{(P * (V/V_b - 1))} \quad \text{Ec. 26}$$

Dónde:

$P_b$  = Presión de burbuja, lpc.a.

$P$  = Presión de la etapa, lpc.a.

$V$  = Volumen total de hidrocarburos a la presión  $P$ , cc.

$V_b$  = Volumen a  $P_b$ , cc.

Cuando se grafican los valores de la función  $Y$  contra presión en coordenadas cartesianas, esta función forma una línea recta o tiene únicamente una ligera curvatura como se muestra en la figura 23. En líneas generales, para crudos con un alto contenido de componentes no hidrocarburos, la función  $Y$  se aleja del comportamiento lineal.

Por otra parte, el comportamiento de la función  $Y$  cerca del punto de burbujeo permite conocer si la presión de burbujeo en el laboratorio ha sido sobre o subestimada en relación a la presión de burbujeo real del yacimiento.

Si la presión de burbujeo señalada en el informe es mayor a la real, los puntos de la función  $Y$  cerca del punto de burbujeo se alejan por encima de la línea, como se muestra en la figura 24-a.

Si la presión de burbujeo señalada en el informe es menor a la real, los puntos de la función  $Y$  cerca del punto de burbujeo se alejan por debajo de la línea, como se muestra en la figura 24-b.

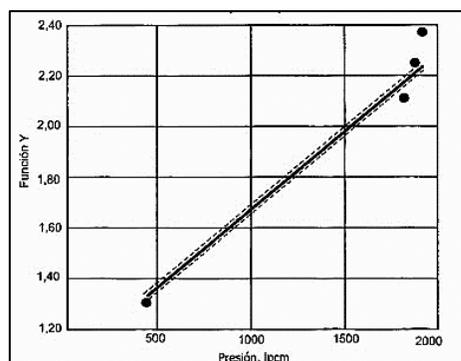
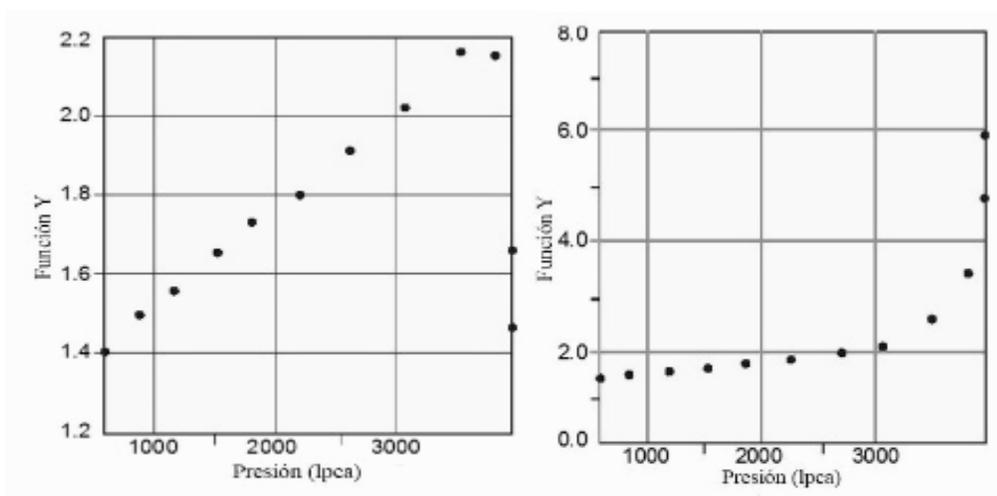


Figura 23. Función  $Y$  vs presión.

Fuente: (Ahmed, 2001).



(a)

(b)

Figura 24. (a) Presión de burbuja subestimada y (b) sobrestimada.

Fuente: (Ahmed, 2001).

De manera similar a lo expuesto anteriormente para muestras de petróleo negro, en la figura 25 se muestra una representación esquemática de la prueba de expansión a composición constante para el caso de un gas condensado. Resulta importante destacar que en este caso la muestra es inyectada en una celda diferente a la empleada para estudios en muestras de petróleo negro. De acuerdo con lo expuesto por (Rojas, 2003), esto es debido a dos razones:

- La presión en el punto de rocío en la mayoría de los sistemas de condensado no puede ser detectada por un cambio brusco en la relación presión-volumen del sistema. Esto se debe a que no ocurre un cambio significativo en la compresibilidad del sistema al caer la presión por debajo de la presión de rocío.
- La fase líquida constituye una pequeña parte del volumen total de la celda. Por lo tanto es necesario tener métodos más precisos de medir pequeñas cantidades de líquido.

En efecto, la celda para gas condensado dispone de un dispositivo especial (boroscopio) ubicado en la parte inferior de la celda, el cual permite observar el interior de la misma y realizar las mediciones de volumen de líquido, así como determinar la presión de rocío visualmente.

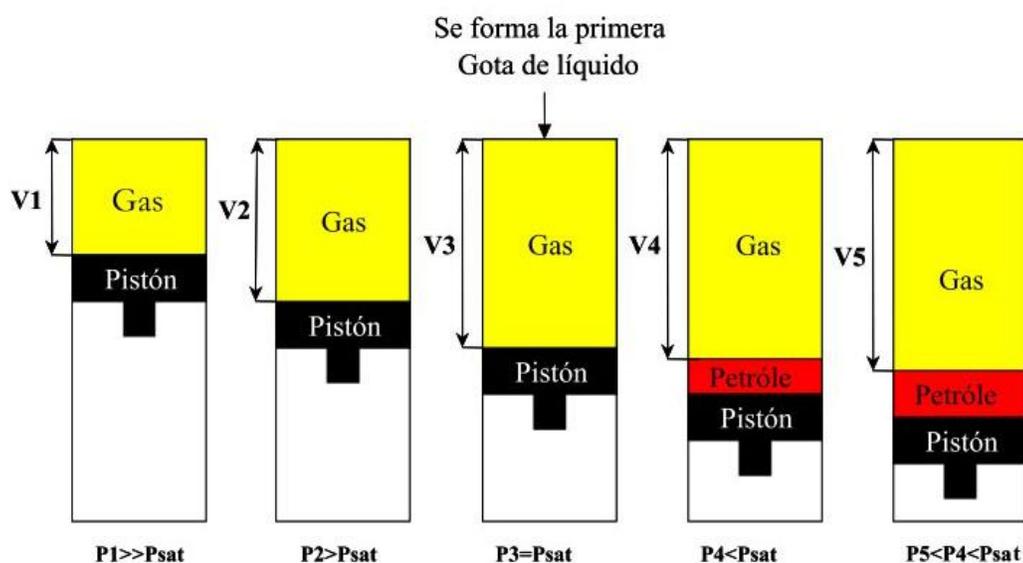


Figura 25. Expansión a composición constante para gas condensado.

Fuente: (Peralta, 2003).

En la figura 26 se presentan los volúmenes relativos de la muestra en función de la presión, obtenidos a partir de la ec. 25. Cabe destacar que no es posible observar el punto de rocío como en el caso del petróleo negro, debido a la compresibilidad. El gas que se encuentra en el yacimiento contiene compuestos pesados que se condensan con una disminución de presión, pero este volumen de condensado es mucho menos compresible que el gas, por lo tanto no se genera un cambio considerable en la curva (Peralta, 2003).

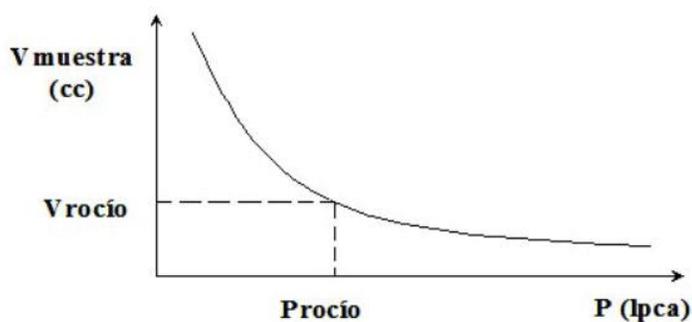


Figura 26. Relación presión-volumen para un gas condensado.

Fuente: (Peralta, 2003).

Es de hacer notar que en el caso de muestras de gas condensado, el punto de rocío determinado visualmente se puede optimizar gráficamente haciendo uso de una modificación de la función  $Y$  ( $Y_{EXT}$ ), como se muestra en la Ec. 27.

$$Y_{EXT}[adim] = \frac{(P_i - P)}{(P_i * (V/V_i - 1))} \quad \text{Ec. 27}$$

Dónde:

$P_i$  = Presión inicial al comienzo de la prueba CCE, lpca.

$P$  = Presión de la etapa, lpca.

$V$  = Volumen total de hidrocarburos a la presión  $P$ , cc.

$V_i$  = Volumen inicial de hidrocarburos en la celda a  $P_i$ , cc.

El método consiste en graficar el Log ( $Y_{EXT}$ ) contra la presión. Los puntos obtenidos por encima y por debajo del punto de rocío visual, se ajustan por mínimos cuadrados. Las curvas obtenidas se extrapolan, y el punto de intersección se registra como la presión de rocío de la mezcla (Hosein, Mayrhoo, y McCain, 2014).

Por último, el volumen de líquido condensado es graficado en función de la presión, como se muestra en la figura 27. Es de hacer notar que la fracción de condensado está definida relativa al volumen total de la celda a la presión de saturación ( $V_{sat}$ ) como se indica en la ecuación 28.

$$V_{liq} (\%) = \frac{V_{liq.ret.}}{V_{sat}} * 100 \quad \text{Ec. 28}$$

El punto 2 representa el volumen mínimo medible (volumen muerto) de líquido condensado en la celda. El punto 1 es el punto de rocío donde el volumen de líquido formado es cero. La curva que une los puntos 1 y 2, es una extrapolación aproximada de la curva, y puede tener varias direcciones, como se muestra con las curvas punteadas. Por ello la importancia en la medición del volumen mínimo de líquido condensado que determina la presión de rocío, por lo tanto, mientras más grande es el volumen muerto de la celda mayor es el error y viceversa.

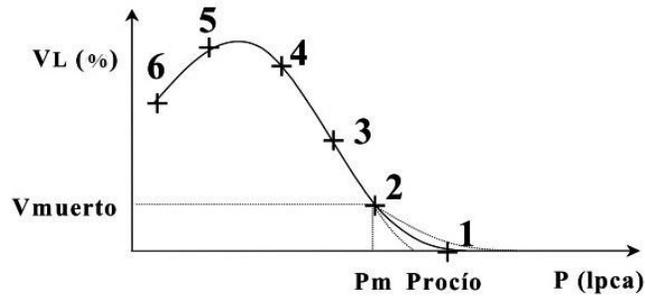


Figura 27. Variación del volumen de condensado retrogrado con presión.

Fuente: (Peralta, 2003).

### 3.2.3. Prueba de liberación diferencial (LD).

La prueba de liberación diferencial es mostrada esquemáticamente en la figura 28. Esta prueba se lleva a cabo en muestras de petróleo, a una temperatura constante (usualmente la temperatura del yacimiento). Para iniciar esta prueba, la muestra se transfiere a una celda PVT a una presión por encima de la presión de burbuja.

El volumen de la celda es expandido en etapas mediante el movimiento vertical de un pistón. Al término de cada etapa, se utiliza un agitador magnético para permitir a la muestra alcanzar el equilibrio. La presión, el volumen y la temperatura son registradas por la computadora para cada etapa. A presiones por debajo de la presión de burbuja, todo el gas liberado en cada nivel de presión es removido de la celda a

presión constante y su volumen es medido a condiciones de la celda y a condiciones estándar.

Asimismo, el volumen de líquido remanente en la celda también es medido. Es de hacer notar que el líquido remanente es continuamente sometido a un cambio en composición, haciéndose cada vez más rico en sus componentes más pesados. Este procedimiento se repite para cada nivel de presión hasta que el sistema alcance la presión atmosférica. Luego, la temperatura del líquido remanente es reducida a 60° F. Este líquido final se conoce como petróleo residual.

Esta prueba permite calcular: (a) el factor volumétrico del petróleo ( $B_o$ ), (b) la relación gas-petróleo en solución ( $R_s$ ), (c) el factor de desviación del gas ( $Z$ ), (d) la gravedad específica del gas ( $\gamma_g$ ), (e) el factor volumétrico del gas ( $B_g$ ), (f) la densidad del petróleo ( $\rho_o$ ), y (g) la gravedad API del crudo.

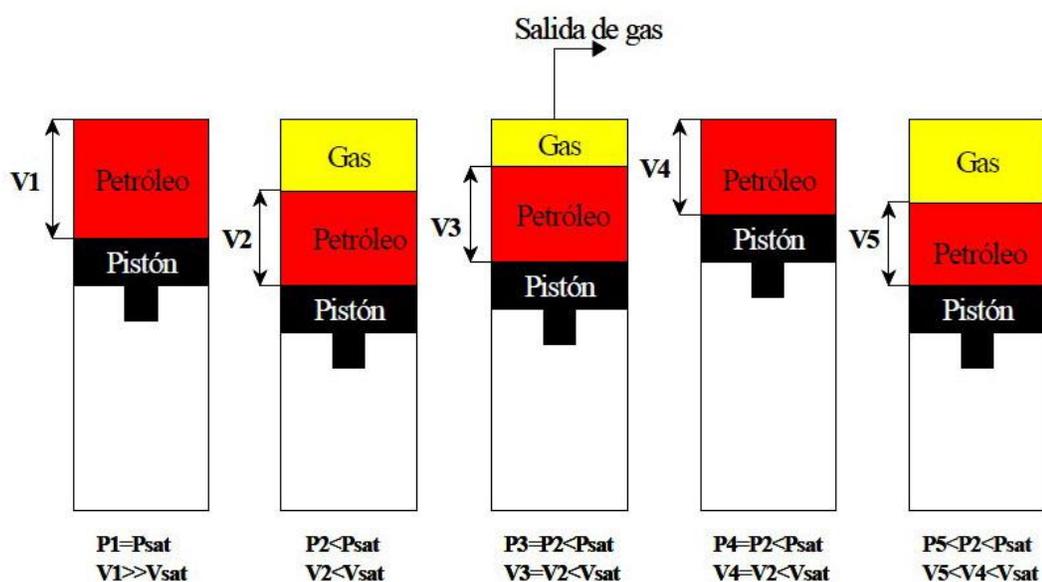


Figura 28. Liberación diferencial para petróleo negro.

Fuente: (Peralta, 2003).

Una de las técnicas aplicadas para asegurar la consistencia de los resultados experimentales obtenidos de la prueba de liberación diferencial, es la prueba de balance de materiales.

En esta prueba se calcula el  $R_s$  a partir de los resultados de la prueba de liberación diferencial, aplicando balance de materiales (teórico), y se compara con el  $R_s$  medido en la prueba de liberación diferencial (experimental). La diferencia entre los dos valores no debe exceder el 5%.

La ecuación de balance de materiales es en esencia una expresión de la ley de conservación de la masa en cualquier yacimiento y su forma matemática se presenta en la ecuación 29.

$$5.615(Bod)_k(\rho_o)_k - 350\gamma_{\text{petróleo}} = \sum_{j=1}^k 0.0764 (\Delta R_{sd})_j(\gamma_g)_j \quad \text{Ec.29}$$

$J=1$  indica la etapa final a presión atmosférica y temperatura del yacimiento donde  $R_s=0$ .

Por otra parte, otro de los métodos aplicados para verificar la consistencia de una prueba de liberación diferencial, es la prueba de desigualdad.

Este método se aplica para presiones por debajo de la presión de burbuja. A medida que la presión cae en el yacimiento, el volumen combinado de los fluidos debe incrementar. La condición a ser satisfecha en la prueba es representada matemáticamente en la ecuación 30.

$$\frac{\partial Bod}{\partial p} < B_g \frac{\partial R_{sd}}{\partial p} \quad \text{Ec. 30}$$

Esta condición solo es satisfecha cuando la caída de presión en cada intervalo es positiva. Si esta prueba no se cumple en datos suministrados a simuladores numéricos, se envía un mensaje de error.

#### 3.2.4. Prueba de separadores.

En la figura 29 se muestra la prueba de separadores. De acuerdo con Rojas (2003), el objetivo de esta prueba es cuantificar el efecto de las condiciones de separación (P, T) en superficie sobre el rendimiento de líquido y sus propiedades. La prueba puede ser realizada en muestras de petróleo o gas condensado.

Para iniciar la prueba, la muestra es transferida a una celda PVT, a la presión de saturación de la mezcla y a la temperatura del yacimiento. La celda es conectada a un

sistema de separación de una o múltiples etapas. Para representar las condiciones de superficie, cada etapa es fijada a diferentes presiones y temperaturas. Luego, la muestra es expelida hacia el sistema de separación y posteriormente expandida a presión atmosférica y 60° F. Para cada etapa, se mide el volumen de líquido resultante y todo el gas liberado es removido.

Aunado a esto, al variar la presión del separador se puede determinar la presión óptima de separación que produzca la mayor cantidad de líquido en el tanque y la menor cantidad de gas. También se puede obtener: el factor volumétrico del petróleo a la presión de burbuja ( $B_{ob}$ ), la relación gas-petróleo a condiciones de separador ( $RGP_{sep}$ ), la gravedad API del petróleo de tanque y la composición del gas liberado.

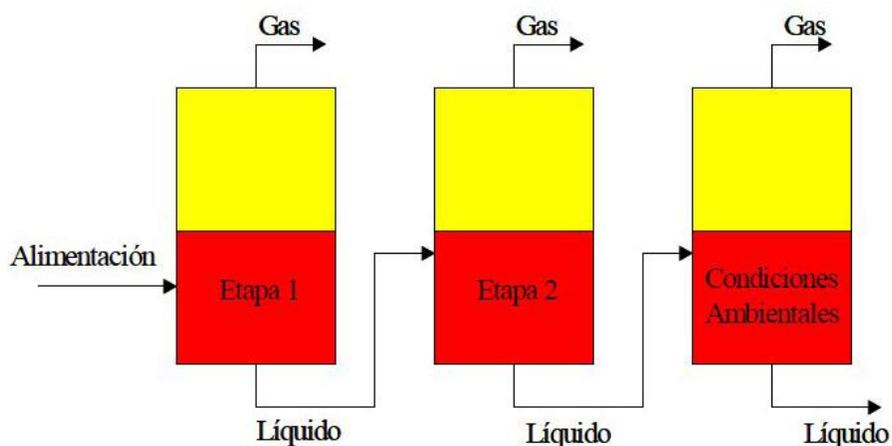


Figura 29. Prueba de separadores de tres etapas para petróleo negro.

Fuente: (Peralta, 2003).

Por otra parte, para asegurar que los resultados de la prueba de separadores sean consistentes, se aplica una técnica denominada prueba de densidad para la validación de muestras de petróleo negro.

Esta prueba es una verificación de balance de materiales que compara la densidad del petróleo a la presión de burbujeo ( $\rho_{ob}$ ) obtenida a partir del experimento de liberación diferencial con la densidad obtenida a partir de la prueba de separadores. Esta prueba se considera válida si la diferencia no es mayor al 5%. La densidad se calcula como se muestra en la ecuación 31.

$$\rho_{ob} = \frac{62.4 \gamma_{tanque} + 0.0136 RGL_{tanque} \gamma_g}{Bob} \quad \text{Ec. 31}$$

Dónde:

$$\gamma_g = \frac{\gamma_{gsep} RGL_{sep} + \gamma_{gtanque} RGL_{tanque}}{RGL_{tanque} + RGL_{sep}}$$

$$RGL_T = RGL_{SEP} + RGL_{TANQUE}$$

### 3.2.5. Prueba de agotamiento a volumen constante (CVD).

La prueba de agotamiento a volumen constante es presentada esquemáticamente en la figura 30. Esta prueba se lleva a cabo en muestras de gas condensado, a una temperatura constante (usualmente la temperatura del yacimiento). Para iniciar la prueba, la muestra en el interior de la celda PVT es presurizada a la presión de rocío de la mezcla de hidrocarburos mediante el movimiento vertical de un pistón flotante.

En este punto, el volumen es medido y registrado como volumen de referencia o volumen inicial de la prueba. Posteriormente, el volumen de la celda es expandido en etapas, disminuyendo la presión del sistema. Al término de cada etapa, se utiliza un agitador magnético para permitir a la muestra alcanzar el equilibrio. Además, el volumen de la celda, la presión, y el volumen de líquido condensado formado son registrados por la computadora. Seguidamente, gas es removido de la celda a presión constante, hasta que el volumen de la misma alcance el volumen de referencia.

Asimismo, el volumen de gas removido es medido a condiciones atmosféricas en el laboratorio y su composición es determinada utilizando un cromatógrafo de gases. Este proceso es continuado hasta alcanzar la presión de abandono.

Esta prueba está diseñada para simular el comportamiento del yacimiento durante el agotamiento de presión, y como esto afecta a la composición del fluido sometido a tales presiones. Normalmente, el volumen del yacimiento se considera constante. Además, se asume como despreciables los parámetros compresibilidad de la roca y compresibilidad del agua.

Como resultado del desarrollo de esta prueba, es posible determinar: (a) la variación en la composición del gas producido (retirado), (b) el factor de desviación del gas producido ( $Z_{gc}$ ), (c) el factor de desviación bifásico de los fluidos remanentes en la celda ( $Z_{2f}$ ), y (d) el volumen de líquido retrogrado.

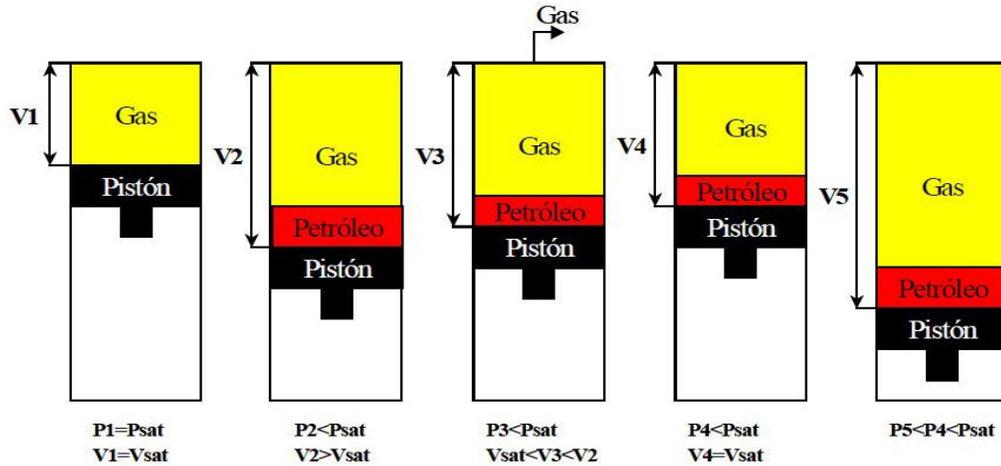


Figura 30. Prueba de agotamiento a volumen constante.

Fuente: (Peralta, 2003).

Por otro lado, para verificar que los resultados obtenidos de la prueba de agotamiento a volumen constante (CVD) sean consistentes, se aplican las siguientes técnicas.

a) *Balance Molar:*

Consiste en determinar las fracciones molares del condensado retrogrado ( $X_i$ ) haciendo un balance molar de fluidos en las diferentes etapas de agotamiento de la prueba CVD. El balance se puede hacer en forma **directa** desde la presión de rocío hasta la presión de abandono de la prueba o en **reversa** (*backwards*) desde la presión de abandono a la de rocío. En ambos casos la prueba consiste en chequear que se cumpla  $X_i > 0$  (Rojas, 2003).

Trabajando de forma directa, se parte del volumen base ( $V_g$ ) de muestra a una presión  $P$  igual a la presión de rocío y se tiene:

$$N_t[\text{lbmol}] = \frac{P_{roc} * V_s}{Z_{gc} * R * T} \quad \text{Ec. 32}$$

Dónde:

$N_t$  = Masa del gas condensado inicial, lbmol

$P_{roc}$  = Presión de rocío, lpca

$V_s$  = Volumen de muestra, pies<sup>3</sup>

$Z_{gc}$  = Factor de compresibilidad del gas a  $P_{roc}$  y T, adim

$R$  = 10,73 lpca\*pies<sup>3</sup>/lbmol\* °R

$T$  = temperatura de la prueba, °R

En la prueba CVD se expande a una presión  $P_1$  ( $< P_{roc}$ ) y luego se retira un volumen de gas ( $\Delta V_1$ ) hasta alcanzar nuevamente el volumen inicial. Debido a la disminución de presión por debajo de la presión de rocío se genera un volumen de líquido retrogrado ( $Vl_1$ ). A la presión  $P_1$  se tiene,

$$\Delta N_{gc_1}[\text{lbmol}] = \frac{P_1 * \Delta V_1}{Z_{gc_1} * R * T} \quad \text{Ec. 33}$$

$$V_{gc_1}[\text{pies}^3] = V_s - Vl_1 \quad \text{Ec. 34}$$

$$N_{gc_1}[\text{lbmol}] = \frac{P_1 * V_{gc_1}}{Z_{gc_1} * R * T} \quad \text{Ec. 35}$$

$$N_{l_1}[\text{lbmol}] = N_t - N_{gc_1} - \Delta N_{gc_1} \quad \text{Ec. 36}$$

Dónde:

$\Delta V_{gc_1}$  ,  $\Delta N_{gc_1}$  = Volumen y masa de gas condensado retirado de la celda

$V_{gc_1}$ ,  $N_{gc_1}$  = Volumen y masa de gas condensado en la celda a  $P_1$

$Vl_1$ ,  $N_{l_1}$  = Volumen y masa de líquido retrogrado en la celda a  $P_1$ , pies<sup>3</sup> y lbmol

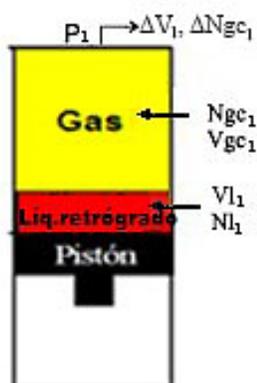


Figura 31. Celda PVT en estado bifásico a  $P_1 < P_{roc}$ .

Usando un procedimiento similar, a una presión de agotamiento  $P_k$  las ecuaciones anteriores toman la forma siguiente:

$$\Delta N_{gc_k} [\text{lbmol}] = \frac{P_k \cdot \Delta V_k}{Z_{gc_k} \cdot R \cdot T} \quad \text{Ec. 37}$$

$$V_{gc_k} [\text{cc}] = V_s - V_{l_k} \quad \text{Ec. 38}$$

$$N_{gc_k} [\text{lbmol}] = \frac{P_k \cdot V_{gc_k}}{Z_{gc_k} \cdot R \cdot T} \quad \text{Ec. 39}$$

$$N_{l_k} [\text{lbmol}] = N_t - N_{gc_k} - \sum_{i=1}^k (\Delta N_{gc_i}) \quad \text{Ec. 40}$$

Dónde:

$$\sum_{i=1}^k (\Delta N_{gc_i}) = \text{Masa de gas condensado de la celda (desde } P_{roc} \text{ hasta } P_k)$$

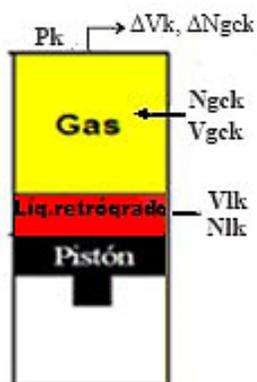


Figura 32. Celda PVT en estado bifásico a  $P_k < P_{roc}$ .

Cuando el informe PVT reporta el gas retirado en porcentaje molar de la masa de gas inicial en la celda los valores de  $\Delta Ngc_k$  y  $Ngc_k$  se obtienen multiplicando los valores reportados por  $N_t$  y dividiéndolos por 100.

La composición del líquido retrogrado se obtiene haciendo un balance de masa global entre las presiones  $P_{k-1}$  y  $P_k$ , como se observa en la figura 33.

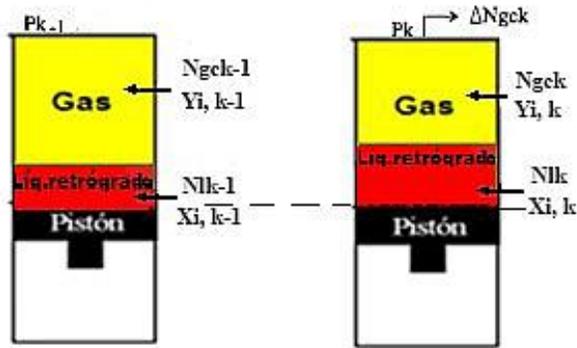


Figura 33. Conceptualización de la prueba CVD entre las presiones  $P_{k-1}$  y  $P_k$  ( $P_{k-1} > P_k$ ).

Balance molar del componente i:

Moles en fases gaseosa y líquida en la celda a  $P_{k-1}$  = moles en ambas fases a  $P_k$  + moles retirados.

$$Ngc_{k-1}Yi_{k-1} + Nl_{k-1}Xi_{k-1} = Ngc_kYi_k + Nl_kXi_k + \Delta Ngc_kYi_k \quad \text{Ec. 41}$$

De donde:

$$Xi_k = \frac{Ngc_{k-1}Yi_{k-1} + Nl_{k-1}Xi_{k-1} - (\Delta Ngc_k + Ngc_k)Yi_k}{Nl_k} \quad \text{Ec. 42}$$

Luego de calcular las  $Xi_k$  las constantes de equilibrio  $Ki_k$  se determinan de la ecuación 45.

$$Ki_k = \frac{Yi_k}{Xi_k} \quad \text{Ec. 43}$$

b) *Criterio Hoffman, Crump y Hoccott:*

Estos investigadores propusieron un método para correlacionar valores de  $Ki$  de mezclas de hidrocarburos que ha tenido gran uso en la validación de pruebas PVT. Consiste en graficar:

Log (KiP) vs. Fi

Dónde:

$K_i = \frac{Y_i}{X_i}$  = Constante de equilibrio del componente

$Y_i$  = Fracción molar del componente i en la fase gaseosa

$X_i$  = Fracción molar del componente i en la fase líquida

$P$  [lpca] = Presión absoluta

$F_i$  = Factor de caracterización del componente i

$$F_i = b_i * \left[ \frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T} \right] \quad \text{Ec. 44}$$

$$b_i = \frac{\log P_{ci} - \log 14.7}{\left[ \frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T_{ci}} \right]} \quad \text{Ec. 45}$$

$P_{ci}$  = Presión crítica del componente i, lpca

$T_{bi}$  = Temperatura normal de ebullición del componente i, °R

$T_{ci}$  = Temperatura crítica del componente i, °R

$T$  = Temperatura, °R

La tabla 5 muestra los valores de  $b_i$  y  $T_{bi}$ ,  $b_i$  se obtiene usando la ecuación 45.

Tabla 5. Valores de  $b_i$  y  $T_{bi}$ . (Rojas, 2003).

Componente	$b_i$	$T_{bi}$ , °R
N <sub>2</sub>	555	140
CO <sub>2</sub>	1819	351
H <sub>2</sub> S	1742	384
C <sub>1</sub>	805	201
C <sub>2</sub>	1412	332
C <sub>3</sub>	1799	416
iC <sub>4</sub>	2037	471
nC <sub>4</sub>	2153	491
iC <sub>5</sub>	2368	542
nC <sub>5</sub>	2480	557
C <sub>6</sub>	2780	616
C <sub>7</sub>	3068	669
C <sub>8</sub>	3335	718
C <sub>9</sub>	3590	763
C <sub>10</sub>	3828	805

A una presión dada los puntos (log (Ki\*P), Fi) correspondientes a varios componentes deben alinearse a través de una recta. Así, al aplicar este criterio a la

prueba CVD se debe obtener un número de rectas igual al número de presiones de los agotamientos y al aplicarlo al separador se obtiene una sola. Dispersión de los puntos muestra malas mediciones y/o deficiencias en el equilibrio termodinámico entre las fases (p. Ej. No se permitió el tiempo suficiente para que ocurriera equilibrio en los diferentes agotamientos de presión). Alta dispersión de los puntos muestra inconsistencia de los resultados (Rojas, 2003).

### 3.2.6. *Estudio de viscosidad*

La viscosidad es descrita como la resistencia interna de un fluido a circular o fluir; el conocimiento preciso de esta propiedad de los fluidos del yacimiento es de vital importancia para el diseño de las condiciones óptimas en actividades operativas tanto en superficie como en condiciones operativas del pozo en general (Ahmed, 2001). Esta prueba se lleva a cabo en muestras de petróleo negro. En laboratorios de análisis PVT se llevan a cabo tres tipos de mediciones de viscosidad cuyos procedimientos se mencionan a continuación:

#### **3.2.6.1 Medición de viscosidad cinemática**

El método está basado en el principio de flujo por gravedad y consiste en medir el tiempo de flujo de un volumen estándar de líquido a través de instrumentos calibrados bajo condiciones de temperatura establecidos, llamados capilares; debe resaltarse que el líquido en estudio fluye por efecto de la gravedad. El procedimiento experimental consiste básicamente en: identificar la muestra posteriormente se estima la viscosidad de la muestra; Se selecciona el capilar calibrado y seco con el rango apropiado para la viscosidad cinemática estimada; luego se coloca el baño térmico a la temperatura deseada; luego se pasa la muestra a través de un filtro # 200, para evitar taponar el capilar y por último, se determina la densidad del petróleo a las condiciones de temperatura de la prueba.

#### **3.2.6.2 Medición de viscosidad dinámica**

La viscosidad dinámica, también llamada viscosidad absoluta, es el resultado de la relación entre la viscosidad cinemática y la densidad del líquido, ambos a las mismas condiciones de presión y temperatura.

$$\mu = \nu * \rho \quad \text{Ec.46}$$

Dónde:

$\mu$ =Viscosidad dinámica.

$\nu$ = Viscosidad Cinemática.

$\rho$ = Densidad.

### 3.2.6.3 Medición de viscosidad saybolt

Consiste en medir el tiempo de flujo de 60 ml de muestra fluyendo a través de un cilindro con un orificio calibrado bajo condiciones controladas de temperatura, el tiempo se multiplica por el factor de corrección del orificio y luego se estima como la viscosidad Saybolt de la muestra de esa temperatura, la prueba se hace para temperaturas específicamente entre 70° y 210° F. El procedimiento apropiado se nombra a continuación: el baño debe llenarse con petróleo térmico al menos ¼” por encima del desbordamiento del viscosímetro; posteriormente, se estabiliza el baño del viscosímetro a la temperatura de la prueba; se agita adecuadamente de tal forma que la temperatura no fluctúe de más de 0,05 °F; y finalmente, se coloca la muestra en el vaso de 100 ml y se precalienta, sin exceder la temperatura de la prueba, luego se agita homogéneamente la temperatura de la prueba.

La viscosidad Saybolt es aplicada de dos formas teniendo como criterio principal el tiempo de flujo a través del orificio capilar como se muestra en la tabla 6, de modo que en la industria petrolera se conocen la viscosidad Saybolt Universal (SUS) y la viscosidad Saybolt Furol (SFS).

Tabla 6. Conversión viscosidad Saybolt a viscosidad cinemática. (Ramírez, 2015).

Viscosidad Saybolt	Unidades Viscosidad	Intervalo tiempo [s]	Viscosidad Cinemática [St]
UNIVERSAL	SUS	32<t<100	$0,00226*t - 1,95/t$
		t>100	$0,0022*t - 1,35/t$
FUROL	SFS	25<t<40	$0,0226*t - 1,84/t$
		t<40	$0,0216*t - 1,35/t$

### 3.3. *Estudios especiales experimentales para fluidos de yacimiento (PVT)*

Los estudios especiales son diseñados con el propósito de mejorar el factor de recobro a través de estudios y evaluaciones de los impactos que ocasionan las tecnologías aplicadas en el campo sobre las propiedades PVT de los fluidos del yacimiento. Son empleados para casos muy específicos, tales como el análisis del comportamiento volumétrico de los fluidos del yacimiento donde se apliquen tecnologías EOR, o en recuperación secundaria como por ejemplo inyección de gas.

En la figura 34 se muestran los estudios especiales de acuerdo con el tipo de fluido a analizar en el laboratorio.

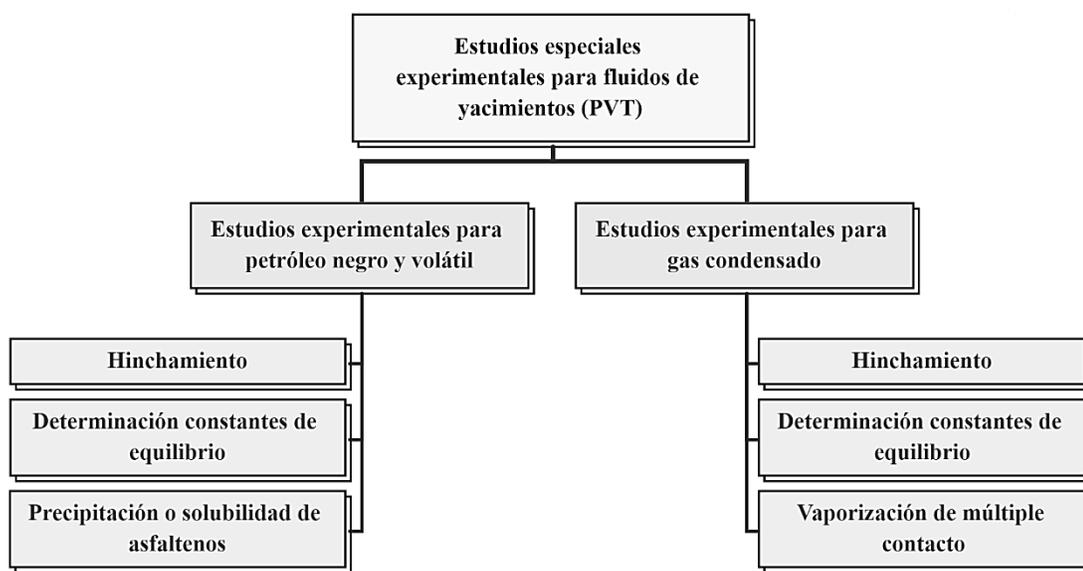


Figura 34. Estudios especiales de acuerdo con el tipo de fluido.

### 3.3.1. Prueba de hinchamiento.

Esta prueba se lleva a cabo principalmente en muestras de petróleo negro y también se puede llevar a cabo sobre gas condensado. De acuerdo con lo indicado por Pedersen y Christensen (2007), la prueba de hinchamiento tiene como objetivo investigar cómo el sistema de hidrocarburos de un yacimiento en particular reaccionará a la inyección de gas.

La prueba consiste en inyectar gas miscible, de composición molar conocida, a una muestra representativa de los fluidos del yacimiento. La composición molar, la relación de solubilidad gas-petróleo, y el comportamiento volumétrico de la muestra son conocidos, de modo que la prueba busca identificar y evaluar la variación de la presión de saturación cuando el gas es inyectado. La figura 35 muestra la expansión volumétrica de la muestra, para la cual, se define un parámetro conocido como factor de hinchamiento, éste es la relación entre el volumen de saturación para cada una de las etapas de inyección ( $V_{sat} @ P_{sat}(i)$ ) de gas y el volumen de saturación de la muestra original ( $V_{sat} @ P_{sat}(o)$ ); la fórmula para calcular este parámetro de hinchamiento es:

$$FH = \frac{Vs_{at}@Ps_{at}(i)}{Vs_{at}@Ps_{at}(o)} \quad \text{Ec. 47}$$

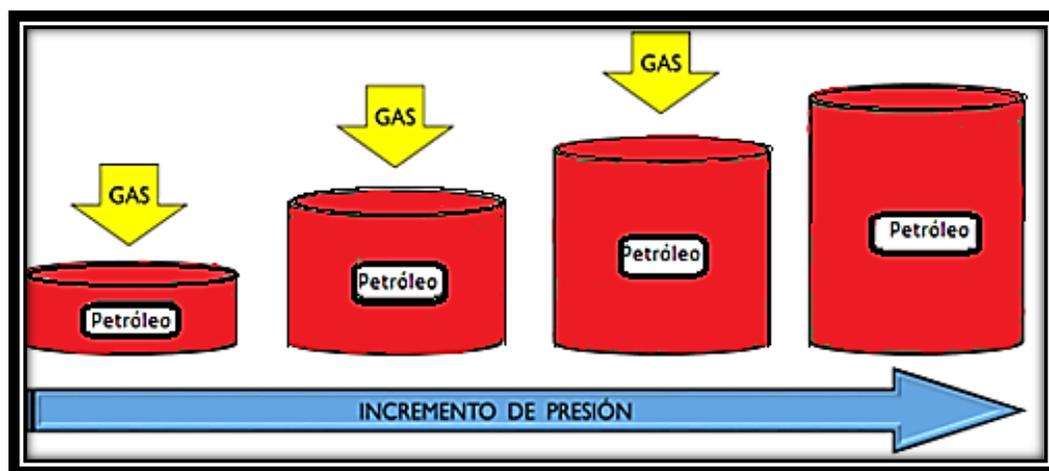


Figura 35. Esquema de la expansión del volumen del petróleo durante la prueba de hinchamiento.

Fuente: (Ramírez, 2015).

### 3.3.2. Determinación de la constante de equilibrio $K$ .

Esta prueba se lleva a cabo en muestras de gas condensado y también en muestras de petróleo negro. Es necesario conseguir las constantes  $K$  de manera experimental para luego comparar estos valores con los teóricos resultantes de las ecuaciones de estado, y saber de esta manera cual es la ecuación de estado que mejor caracteriza el yacimiento para cálculos de reservas, determinar el petróleo original in situ (POES) y diseñar óptimos mecanismos de producción, entre otras cosas (Peralta, 2003).

Se parte ejecutando una prueba de liberación diferencial trabajando con un sistema bifásico posteriormente se lleva a cabo una prueba de liberación de flash para obtener las composiciones de la fase líquida y gaseosa por separado luego, se calcula la constante de equilibrio que es la relación entre la fracción molar del componente de la fase de vapor ( $Y$ ) y la fracción molar del mismo componente en la fase líquida ( $x$ ). Luego se calcula la constante de equilibrio que es la relación entre la fracción molar del componente de la fase de vapor ( $Y$ ) y la fracción molar del mismo componente en la fase líquida ( $x$ ). Como lo indica la ecuación 48.

$$K = Y/X$$

Ec. 48

En la figura 36 se muestra la gráfica del comportamiento de la constante de equilibrio  $K$  (eje  $y$ ) en función de la presión (eje  $x$ ) para diferentes componentes.

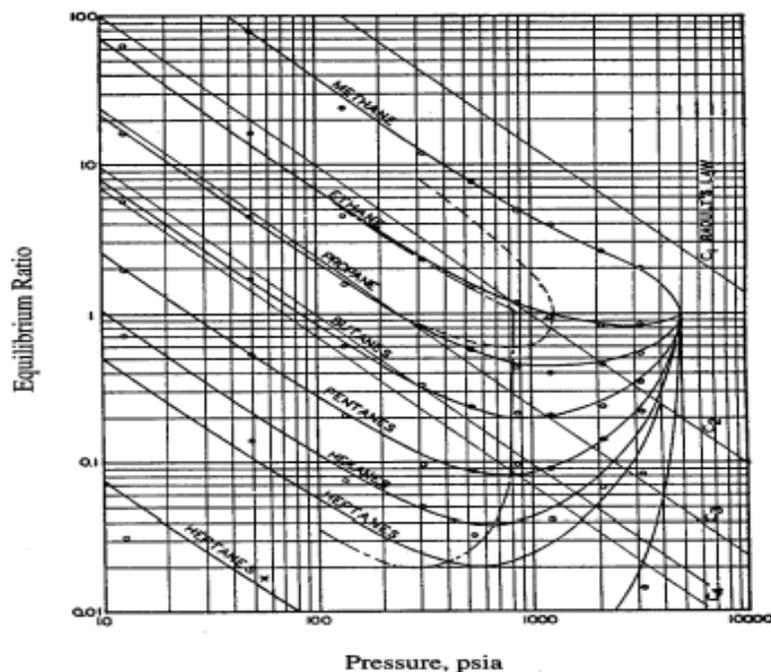


Figura 36. Comportamiento de las constantes de equilibrio.

Fuente: (Peralta, 2003)

### 3.3.3. Prueba de vaporización de múltiple contacto.

El propósito de la prueba de múltiple contacto es suministrar una idea de cómo se comporta el equilibrio de fases cerca de un pozo inyector de gas. Esta prueba se lleva a cabo en muestras de gas condensado. Como se puede observar en la figura 37, el experimento se inicia en una celda visual PVT la cual inicialmente contiene una cantidad conocida de la muestra representativa de la mezcla de petróleo del yacimiento donde se espera inyectar el gas, bajo condiciones del yacimiento de acuerdo a la ubicación del pozo inyector. Luego una cantidad específica de gas, de composición conocida, es agregada a la celda PVT manteniendo las condiciones de la

prueba constantes y se reporta este volumen. Según Pedersen y Christensen (2007), la prueba es estudiada desde dos puntos de vista.

El primero llamado experimento de contacto frontal (*Forward-contact experiment*); donde la fase de gas es desplazada entre las etapas de la prueba y mezclada hasta alcanzar el equilibrio con la fase líquida (petróleo crudo) fresca en cada cámara. A medida que la fase de gas avanza a través de las cámaras, su composición se hace más rica en componentes hidrocarburos extraídos del contacto gas-petróleo anterior, de manera que su volumen es incrementado tras cada etapa.

El otro caso es para el experimento de contacto en contra flujo (*Backward contact experiment*) en el cual la fase líquida (petróleo crudo) es desplazada entre las etapas de la prueba y es mezclada hasta alcanzar el equilibrio con la fase de gas (para inyección) fresca. Finalmente, se espera que similar al contacto frontal, la presión de saturación incremente, y el volumen de petróleo sea menor que en la etapa inicial. Posteriormente el volumen de petróleo y gas del equilibrio de fases son reportados y es determinada la composición de petróleo y gas en equilibrio, para cada etapa.

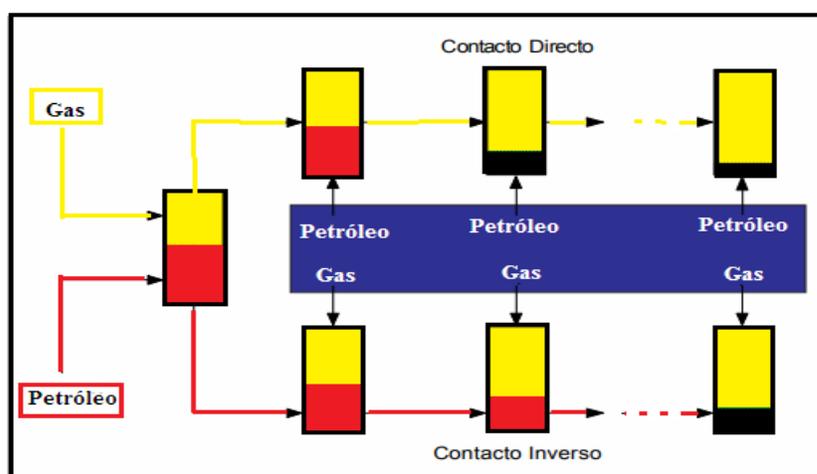


Figura 37. Esquema de la prueba de múltiple contacto.

Fuente: (Pedersen y Christensen, 2007).

Antes de conocer en que consiste una prueba de precipitación de asfaltenos es importante conocer un poco sobre los mismos.

Los asfáltenos son una familia de compuestos químicos orgánicos del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por ende, los de mayor punto de ebullición. Se ha comprobado que los asfáltenos son fracción de compuestos que existen naturalmente en el crudo como agregados de núcleos, aromáticos, condensados, sustituido por grupos alifáticos y naftenos; los cuales poseen heteroátomos (hidrogeno, oxigeno, azufre, ). Como se muestra en la figura 38 los asfáltenos se encuentran localizados en una estructura con variedad de formas.

Los problemas asociados a la precipitación de asfáltenos ocurren tanto en el subsuelo como en la superficie, afectando la explotación de los yacimientos de hidrocarburos; entre los principales problemas ocasionados por la presencia de asfáltenos se tiene: taponamiento del yacimiento y en la vecindad del pozo, taponamiento de la tubería de producción, taponamiento de las líneas de flujo y demás equipos de superficie, deterioro de la calidad del crudo por la formación de emulsiones estables, entre otros.

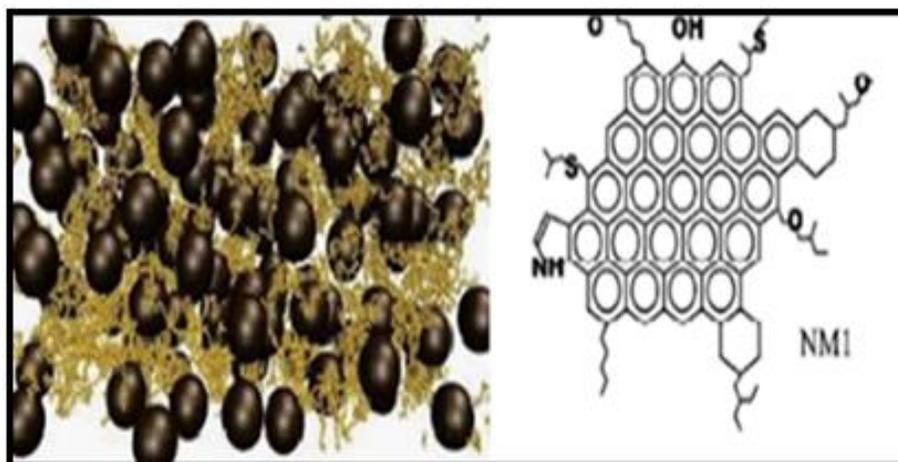


Figura 38. Estructura de asfáltenos en un crudo venezolano.

Fuente: (Ovando, 2012).

#### 3.3.4. Prueba de precipitación de asfáltenos.

La prueba de precipitación de asfáltenos se lleva a cabo para determinar a través de métodos gravimétricos la curva de dispersión de asfáltenos en muestras de

petróleo negro, estudiando el líquido proveniente de los equilibrios a varias presiones y manteniendo la temperatura constante (temperatura de yacimiento). Esta prueba se lleva a cabo en muestras de petróleo negro y en muestras de gas condensado con presencia de asfáltenos.

Esta prueba parte cuando se homogeniza una muestra a las condiciones del yacimiento. Para aquellos puntos de presiones que sean mayores a la presión de burbuja se procede a hacer una sola inyección a la celda; posteriormente de estabilizar a cada punto de presión se realiza una prueba de liberación *flash* a diferentes presiones; para aquellos puntos donde las presiones sean menores a la presión de burbuja, se procede a hacer una nueva inyección de muestra estabilizada; una vez estabilizada se desplaza el gas producido para posteriormente ejecutar una prueba de liberación *flash* a diferentes presiones; se introduce una muestra y se repite el procedimiento para la determinación del contenido de asfáltenos (% p/p) según la norma IP/143. Si la cantidad de asfáltenos en solución o suspensión pase por un minuto, esto significa que se está en presencia del punto máximo (punto donde el asfáltenos han precipitado) (Peralta, 2003).

Con esta prueba se puede obtener esencialmente el contenido de asfáltenos, en cuyo caso si no hay precipitación pueden re disolverse a presiones inferiores al punto de burbuja o a regresar a la presión inicial para esto se debe lograr que el contenido de asfáltenos descienda hasta llegar a un mínimo en las cercanías del punto de burbuja.

### 3.4. *Análisis composicional*

La mayoría de los parámetros medidos en el estudio de fluidos de yacimiento pueden ser calculados con cierto grado de precisión a partir de la composición. Esto representa la descripción más completa que puede ser realizada a un fluido del yacimiento. Tradicionalmente, las composiciones de los fluidos del yacimiento han sido medidas para incluir la separación de los componentes metano ( $C_1$ ) hasta el hexano ( $C_6$ ), con los heptanos y componentes más pesados agrupados como un solo componente ( $C_7^+$ ) reportado con una densidad y peso molecular promedio. Este nivel

resulta inadecuado para una simulación precisa del comportamiento de fases y propiedades físicas de las mezclas de hidrocarburos, requiriéndose una descripción más completa de los componentes pesados, que abarque hasta el C<sub>10</sub> como mínimo.

En años recientes, nuevos métodos han sido desarrollados para la determinación experimental de la composición de mezclas de hidrocarburos. Estos métodos producen una descripción de los sistemas de hidrocarburos mucho más detallada y precisa (Pedersen, Fredenslund, y Thomassen, 1989). Estas técnicas incluyen cromatografía de gas y líquido.

La cromatografía es un método físico de separación en el cual los componentes a ser separados son distribuidos entre dos fases, una de las cuales es estacionaria (fase estacionaria) mientras que la otra (la fase móvil) se mueve en una dirección específica (Miller, 1988).

La metodología empleada en el laboratorio para obtener la composición total de un fluido del yacimiento involucra analizar separadamente las muestras de las fases líquida y de gas producidas de la liberación instantánea, (véase figura 39). La descripción composicional de la fase de gas es llevada a cabo mediante cromatografía de gases (GC), desde C<sub>1</sub> hasta C<sub>11</sub><sup>+</sup>. Muchas veces, dependiendo del enriquecimiento del gas el análisis solo alcanza hasta el C<sub>6</sub><sup>+</sup> o C<sub>7</sub><sup>+</sup>.

Por otra parte, la descripción composicional de la fase líquida involucra cromatografía de líquido (LC), (destilación simulada, parafinas, naftas y aromáticos (PNA)), peso molecular y densidad. Normalmente, para determinar el peso molecular y densidad del líquido, se aplican las técnicas de depresión del punto de congelamiento (DC) y densimetría (DM), respectivamente.

Finalmente, se realiza una recombinación matemática en una herramienta computacional (*Microsoft Excel*), obteniéndose como resultado la composición original del fluido de yacimiento.

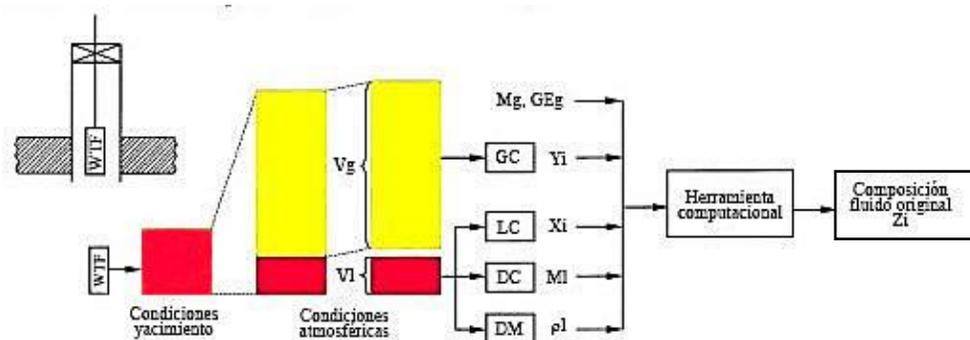


Figura 39. Procedimiento de recombinação de muestras tomadas de la liberación flash para obtener la composición del fluido original de una muestra de fondo; WTF= muestreador; GC= cromatografía de gas; LC= cromatografía de líquido; DC= depresión punto de congelamiento; y DM= densímetro.

Fuente: (Whitson y Brulé, 2000).

Las técnicas implementadas para determinar la composición del gas, composición del líquido y peso molecular, se describen en detalle a continuación:

### 3.4.1. Cromatografía de gases.

La cromatografía de gases es una técnica de laboratorio usada para identificar y medir concentraciones. La mezcla de hidrocarburos es separada en sus componentes basándose en la atracción relativa hacia dos fases, una fase estacionaria y una fase móvil (el gas de arrastre), (Bahadori, 2016). El gas de arrastre debe ser muy puro, seco y químicamente inerte. Nitrógeno, helio, argón y dióxido de carbono son los gases de arrastre más comúnmente utilizados.

La muestra vaporizada a analizar es arrastrada por la fase móvil hacia una columna cromatográfica (fase estacionaria) donde ocurre la separación física. Luego, los componentes separados ingresan a un detector donde la concentración de cada componente puede ser determinada. Los detectores de ionización a la llama (*Flame Ionization Detector*, FID) y conductividad térmica (*Thermal Conductivity Detector*, TCD) son los más utilizados. Como resultado de esta prueba se obtiene el porcentaje en peso de los componentes detectados, desde  $C_1$  hasta  $C_{11}^+$ . La fracción en peso es convertida a fracción molar utilizando el peso molecular.

### 3.4.2. Destilación simulada.

La destilación simulada se utiliza con el fin de determinar la fracción de volumen del líquido destilado. Esta prueba permite obtener la distribución del rango de ebullición del petróleo crudo por medio de una cromatografía de gas. Se fundamenta en que los componentes individuales de una muestra eluyen de las columnas cromatográficas no polares, en un orden que coincide con su punto de ebullición. Este ensayo se realiza utilizando el método estándar ASTM D5307-97 (revisada en 2002) y se aplica a todos los tipos de crudo.

El método consiste en que la muestra de petróleo se diluye con disulfuro de carbono. La solución resultante se inyecta dentro de la columna cromatográfica de gases que separa los hidrocarburos en orden de punto de ebullición. La temperatura de la columna se eleva linealmente, y el área bajo la curva del cromatograma se registra a través del proceso. Los puntos de ebullición se asignan al eje del tiempo, por comparación a una curva de calibración obtenida bajo iguales condiciones cromatográficas, pero para una mezcla de n-parafinas de punto de ebullición conocidos a una temperatura de 538°C.

Con esta data, se calcula la distribución del rango de ebullición para la muestra, utilizando un sistema de procesamiento de datos, el cual permite conocer la fracción de volumen destilado en función de la temperatura a la cual ebullicen todos los componentes presentes en la muestra analizada. La determinación de la distribución del rango de temperaturas de ebullición es un requerimiento esencial en crudos. Esta información puede usarse para estimar el rendimiento en la refinería y para evaluar económicamente el uso particular de un crudo.

### 3.4.3. Análisis PNA (Parafinas, Naftenos y Aromáticos).

Para determinar el contenido de Parafinas, Naftas y Aromáticos existen varias normas. Una de ellas es la norma ASTM D5443, 04 la cual incluye la determinación de los hidrocarburos por familia química, a saber: Parafinas, Naftenos, Olefinas y

Aromáticos. Para ello se realiza el análisis de cromatografía de gases de alta resolución.

Esta norma permite la determinación detallada de los hidrocarburos existentes en naftas y gasolinas, comprendidas en el intervalo de ebullición IBP-230 °C, específicamente en cortes de C<sub>2</sub> a C<sub>12+</sub>.

La muestra se inyecta al cromatógrafo de gases en forma manual o automática. Una vez que esta se ha vaporizado en el inyector, se introduce a la columna y cada uno de sus componentes se separan y se queman en el detector de ionización a la llama (FID) a medida que emergen de la columna. Se produce una señal que es adquirida y luego analizada utilizando un sistema especial de procesamiento de datos. La identificación de cada componente se realiza por comparación entre los tiempos de retención de los picos de la muestra, con los tiempos de retención de la tabla de calibración de una muestra conocida de nafta y/o gasolina, tomada como referencia.

La concentración en peso de cada componente se determina por normalización de áreas y factores de respuesta. El porcentaje en volumen se calcula utilizando gravedades específicas a 60°F, y el porcentaje molar utilizando el peso molecular de cada compuesto.

#### 3.4.4. *Determinación del Peso Molecular promedio del líquido.*

El peso molecular es un parámetro físico-químico fundamental, que puede usarse en conjunto con otras propiedades para caracterizar hidrocarburos puros y sus mezclas. Varias técnicas han sido propuestas para determinar el peso molecular promedio de fracciones de hidrocarburos. Las técnicas están basadas en elevación del punto de ebullición, depresión del punto de congelamiento, osmosis de la fase vapor, y otros factores. Todos estos métodos tienen rangos de precisión limitados y deben ser aplicados para rangos específicos de pesos moleculares.

La mayoría de los crudos medianos y livianos tienen pesos moleculares en el rango de 100-500 gr/gr-mol. El método más adecuado para determinar pesos moleculares dentro de este rango es aquel basado en la depresión del punto de congelamiento.

El principio, de este método consiste en que el punto de congelamiento de un solvente puro (benceno o nitrobenceno) es disminuido cuando el solvente es contaminado con una pequeña cantidad de crudo. La diferencia de temperatura,  $\Delta T$ , es una medida del peso molecular por mol de una muestra de crudo. Es de hacer notar que el método es muy sensible y, además, difícil de usar (Pedersen et al., 1989).

#### 4. Sistema Chandler PVT 3000

El sistema Chandler PVT 3000 está integrado por diversos componentes de la compañía Chandler Engineering; los cuales pueden trabajar de manera autónoma o en conjunto, controlados electrónicamente por el sistema de control y adquisición de datos o panel de control (Software PVT 3000). Este sistema permite llevar a cabo los diversos análisis PVT en muestras de petróleo negro y gas condensado.

En la figura 40 se presentan los componentes que integran el sistema Chandler PVT 3000 perteneciente al laboratorio de PVT de la Escuela de Petróleo de la Facultad de Ingeniería de la UCV.



Figura 40. Sistema Chandler PVT 3000.

El sistema Chandler PVT 3000 se puede definir como un instrumento de precisión y multitareas diseñado para el estudio del comportamiento de mezclas complejas; el estudio de las propiedades termodinámicas de los fluidos, como el comportamiento de fase, la densidad, la viscosidad; todo esto bajo condiciones variables de presión, temperatura y volumen. Este equipo se utiliza para realizar estudios de PVT en una variedad de fluidos con un énfasis especial en aquellos fluidos que se encuentran típicamente en los yacimientos de hidrocarburos. El equipo Chandler PVT 3000 es un instrumento capaz de simular las condiciones de presiones y temperaturas de un yacimiento de hidrocarburos (Chandler, 2009).

El sistema está diseñado especialmente para llevar a cabo pruebas PVT convencionales; sin embargo, se pueden realizar pruebas PVT no convencionales (crudo pesado y extra pesado) teniendo en cuenta que para este tipo de pruebas no se hace uso del sistema de agitación magnético incorporado en las celdas. Además, las pruebas no convencionales generalmente implican un mayor tiempo de duración que las convencionales.

Entre los tipos de estudios PVT que se realizan comúnmente en el sistema Chandler PVT modelo 3000 se incluyen:

Pruebas convencionales:

- Prueba de liberación instantánea de flash en una y dos etapas.
- Prueba de expansión a composición constante (CCE),
- Prueba de Liberación Diferencial (LD).
- Prueba de separadores.
- Prueba de agotamiento a volumen constante (CVD).
- Prueba de viscosidad.

Pruebas especiales:

- Prueba de vaporización de contacto múltiple.
- Prueba de precipitación de asfáltenos.
- Prueba de hinchamiento.

- Determinación de la constante k.

Características del sistema Chandler PVT 3000:

- Permite la detención de sólidos en fluidos de la formación, como asfáltenos y ceras.
- Utiliza el software PVT 3000 para la adquisición de datos electrónicos.
- Esta hecho de materiales resistentes a la corrosión causada por el sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S).
- El equipo tiene un sistema automatizado de adquisición de datos de presiones, volúmenes y temperaturas.
- La temperatura la genera un horno con baño de aire, éste valor se introduce en la computadora.
- Este sistema está diseñado para funcionar de manera continua durante extensos periodos de tiempos (3 semanas).

Especificaciones del sistema Chandler PVT 3000:

- Presión máxima de funcionamiento: 20000 lpc
- Temperatura máxima de operación: 204° C (400° F).
- Volúmenes de las Celdas:
  - Celda bomba: 400 cc.
  - Celda de Gas condensado : 1000 cc
  - Mini celda: 100cc.
- Exactitud de volumen: 0,1 cc.
- Exactitud del volumen del líquido acumulado: 0,01 cc.
- Precisión de temperatura: 0,1 °C.
- Máxima presión de operación:
  - Celda bomba: 15,000 lpca (103.4 Mpa, 1034 bar).
  - Celda de gas condensado: 20,000 lpca (137,9 Mpa, 1379 bar).
  - Mini celda: 15,000 lpca (103,4 Mpa, 1034 Mbar).

- Precisión de la Presión:  $\pm 0,1$  % escala completa
- Requerimientos eléctricos: 220-240 voltios ,20Amp (4800 Watts) máxima (Se sugiere usar 25 amperios ,600 Watt) del circuito de la instalación a la fuente de poder del instrumento.
- Dimensiones: 76'' (193cm) H x 51'' (130 cm) W x 38'' (97 cm), no incluye la bomba externa.
- Peso: pesa aproximadamente 1000 libras (454 kg), sin incluir módulos opcionales o equipos externos al mismo.

#### 4.1. Localización de componentes del Sistema Chandler PVT 3000

En la figura 41, se muestra cada componente del equipo identificado para familiarizarse con el sistema.

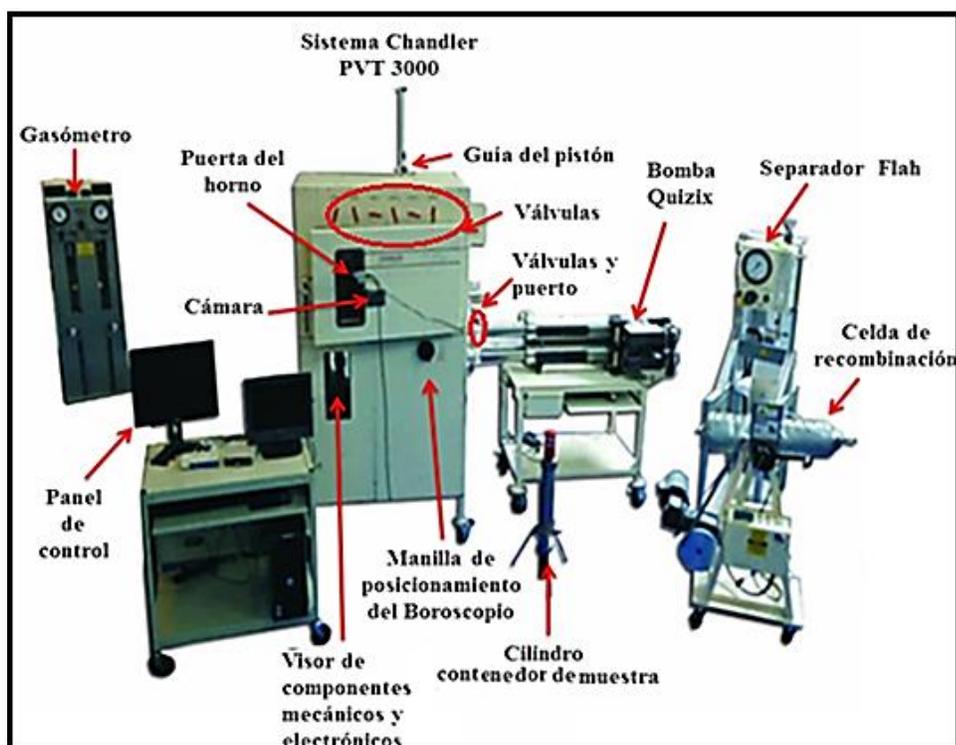


Figura 41. Componentes del Sistema Chandler PVT 3000.

## 4.2. Descripción de los componentes del Sistema Chandler PVT 3000

### 4.2.1. Software Quizix PumpWorks.

*PumpWorks* es un programa que permite el control completo y automatizado de las bombas Quizix y está basado en ventanas. Esto quiere decir que la mayoría de las opciones de los menús, al ser seleccionadas ocasionan que se abra una ventana en la pantalla. El programa, es fácil de instalar y se puede usar con cualquier bomba Quizix o un sistema de bombas completo. Al instalar el software *PumpWorks* para *Windows*, un asistente de instalación guía al usuario a lo largo de todo el proceso (Chandler, 2008).

La computadora debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Ordenador compatible con PC y sistemas operativos *Windows 95*, *Windows 98*, *Windows NT*, *Windows 2000*, y *Windows XP*.
- Unidad de disco CD.
- Al menos 10 Mb de espacio disponible en el disco duro.
- *PumpWorks* sirve como un canal de comunicación bidireccional entre el usuario y el sistema de bombeo.
- La bomba puede ser programada para entregar una cantidad de fluido establecida por el usuario, u operar durante un tiempo determinado y luego detenerse automáticamente.
- El usuario puede regular cada aspecto del sistema de la bomba, lo que permite una gran cantidad de flexibilidad.

En la figura 42, se muestra la ventana *Pump Data and Controls Window* o ventana principal, la cual aparece en pantalla cuando el programa *PumpWorks* es iniciado. La ventana principal es el núcleo de *PumpWorks* y muestra información y opciones de configuración hasta para ocho bombas (dieciséis cilindros).



Figura 42. Ventana principal del software PumpWorks.

Fuente: (Chandler, 2008).

De acuerdo a la figura 42, se explica brevemente la pantalla principal en los ítems superiores, que consta de la barra de título (contiene el nombre de la ventana que está abierta y activa), la barra de menú (contiene diez menús desplegables desde los cuales el usuario puede acceder a opciones adicionales), y la barra de estado.

En la tabla 7, se reflejan las actividades que se presentan en la barra de menú en la parte superior de la figura 42.

Tabla 7. Ventanas de la barra de menú. (Chandler, 2008).

<b>Ventanas de la barra de menú</b>	
<b>Menú principal (Main)</b>	En esta ventana el usuario puede iniciar o detener los cilindros de la bomba, configurar la presión de la bomba, las tasas de flujo y la presión de seguridad, además, restablecer el recuento de volumen del cilindro a cero.
<b>Registro de datos (DataLog)</b>	Este menú le permite al usuario registrar automáticamente los datos de un experimento en un archivo de datos registrados donde tendrá el control sobre qué datos se registrarán y con qué frecuencia, y podrá elegir ver el registro de datos, escribir observaciones en el registro de datos o copiar el

	registro de datos en un disco.
<b>Menú AutoOp</b>	<p>Esta ventana permite al usuario un control automático avanzado sobre el sistema de bombeo. A través de este menú, el usuario puede:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Configurar y controlar el cambio gradual de un caudal o presión de ajuste a otro durante un periodo de tiempo específico.</li> <li>• Configurar y controlar el funcionamiento automático de volumen / tiempo, que permite que los cilindros de la bomba dejen de bombear.</li> <li>• Operar la configuración y control del secuenciador, que es el uso de la lógica para controlar el funcionamiento del sistema de bombeo desde un archivo creado por el usuario.</li> </ul>
<b>Menú de gráficos (Graphs)</b>	<p>Esta ventana permite configurar múltiples configuraciones de gráficos, y luego abrir ventanas gráficas para graficar datos usando esas configuraciones. Cada configuración de gráfico especifica qué datos se graficarán, qué tan rápido se tomarán los puntos de datos, el formato del gráfico, entre otras.</p>
<b>Otros Menús (Other)</b>	<p>Este menú permite al usuario configurar y controlar diversos componentes y operaciones del sistema, que incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibración del transductor de presión del software.</li> <li>• Señales de entrada analógicas y digitales auxiliares.</li> <li>• Válvulas auxiliares de control (añadidas por el usuario).</li> <li>• Salida digital auxiliar.</li> <li>• Ver datos del volumen de fluidos de un separador (añadido por el usuario).</li> <li>• Controlar un regulador de contrapresión (añadido por el usuario).</li> <li>• Ver y configurar temporizadores y ecuaciones matemáticas ingresadas por el usuario y sus resultados.</li> </ul>
<b>Error / Menú de Registro (Error / Log)</b>	<p>Las siguientes opciones están disponibles en este menú:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estado del sistema.</li> <li>• Registro de errores actuales.</li> <li>• Errores y eventos previos.</li> <li>• Estado del cilindro.</li> <li>• Seleccionar Eventos / Errores para ver.</li> <li>• Mostrar captura de estado de error.</li> <li>• Cambiar al modo de captura de estado de error.</li> <li>• Crear archivo de diagnóstico.</li> </ul>
<b>Menú Configurar (Configuration)</b>	<p>Esta ventana se usa para configurar el sistema de bombeo que mejor se adapte al experimento del usuario. A través de este menú se puede elegir lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Configurar unidades mostradas y puestos decimales.</li> <li>• Configurar los parámetros de operación de la bomba.</li> <li>• Configurar el control de presión.</li> <li>• Tasas de flujo de escala de la bomba.</li> <li>• Configurar los parámetros de recirculación.</li> <li>• Configurar el sistema predeterminado.</li> <li>• Configurar el sistema para mostrar el estado de errores.</li> <li>• Configurar la asignación de recursos.</li> <li>• Configurar el promedio de datos.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configurar secuencias.</li> <li>• Ver información de la bomba.</li> <li>• Reasignar número de bomba.</li> <li>• Desinstalar la bomba.</li> <li>• Configuraciones de captura de estado de error.</li> <li>• Configuración de entrada analógica extendida (conexiones y configuración de sensores).</li> <li>• Ajustes del sistema; como, cerrar automáticamente las ventanas después de enviar un comando, iniciar o detener los cilindros de la bomba con teclas de función, enumerar los cilindros de la bomba individualmente o por pares en la ventana principal de <i>PumpWorks</i>.</li> <li>• Configuración del controlador de la bomba.</li> </ul>
<p><b>Menú de Comunicaciones</b> (<i>Communications</i>)</p>	<p>Esta ventana se usa para configurar o cambiar el enlace entre PumpWorks y la(s) bomba(s). A través de este menú, se puede hacer lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Buscar bombas.</li> <li>• Opciones de búsqueda.</li> <li>• Comunicaciones y configuración de los separadores disponibles.</li> <li>• Comunicaciones del regulador de presión de respaldo.</li> <li>• Comunicaciones en modo host (Host Mode Communications, es donde el usuario configura los parámetros de comunicación con esa computadora remota).</li> <li>• Ver estado de comunicación.</li> <li>• Actualizar el software del panel frontal.</li> <li>• Actualizar el software del controlador de la bomba.</li> </ul>
<p><b>Menú de la ventana</b> (<i>Windows</i>)</p>	<p>Esta ventana permite al usuario elegir cómo se organizarán varias ventanas en el escritorio. Aquí también se muestran todas las ventanas abiertas.</p>
<p><b>Menú de ayuda</b> (<i>Help</i>)</p>	<p>Este menú proporciona acceso a una versión de software fácil de usar del Manual del usuario de <i>PumpWorks</i>, así como a la versión del software <i>PumpWorks</i> actualmente instalada y la información del controlador de la bomba que es específica para el sistema de bombeo de un usuario.</p>

Barra de estado (*Status Bar*): La barra de estado, que se encuentra debajo de la ventana principal, muestra mensajes sobre el estado de los controladores de la bomba, el registro de datos, el secuenciador, el programador, las macros y los mensajes de error. Esta característica permite al usuario chequear el estado de los cilindros de la bomba rápidamente. La barra de estado tiene seis secciones, que se explican a continuación en la tabla 8 y se observan en la figura 43 (Chandler, 2008).



Figura 43. Barra de estado de la ventana principal.

Fuente: (Chandler, 2008).

Tabla 8. Ventanas de la barra de estado. (Chandler, 2008).

Ventanas de la barra de estado	
<b>Bombas activas</b>	Esta parte de la barra de estado muestra que bombas están instaladas y comunicándose con <i>PumpWorks</i> . El número de bomba de cada bomba instalada en <i>PumpWorks</i> aparecerá después de las palabras “Active Pumps”.
<b>Registro de datos</b>	Esta parte de la barra de estado muestra si los datos se registran o no en un archivo de registro de datos.
<b>Secuenciador</b>	Esta parte de la barra de estado muestra si el Secuenciador se está ejecutando o no.
<b>Programador</b>	Esta parte de la barra de estado muestra si el Programador se está ejecutando para cualquier cilindro o no.
<b>Macro</b>	Esta parte de la barra de estado muestra si <i>PumpWorks</i> está registrando y/o reproduciendo una macro. Se leerá <i>Macro – OFF</i> , <i>Macro Record Active</i> , <i>Macro Playback Active</i> o <i>Macro Record y Playback Active</i> .
<b>Errores</b>	Esta parte de la barra de estado muestra si hay errores presentes o no. La barra de estado puede mostrar los siguientes cuatro mensajes de error diferentes: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin errores.</li> <li>• Errores presentes: indica si actualmente hay una o más condiciones de error presentes en el sistema de la bomba.</li> <li>• Verificar registros de errores: este mensaje advierte al usuario que todavía hay un error presente en el sistema de bombeo que no se ha resuelto, aunque se haya confirmado en el registro de errores.</li> <li>• Errores no resueltos: este mensaje le recuerda al usuario que persiste un error en el sistema de bombeo que no ha sido resuelto, aunque se haya confirmado en el registro de errores.</li> </ul>

#### 4.2.2. Descripción de la pantalla del programa principal PVT 3000.

En la figura 44 se muestra la pantalla principal del programa de operación del sistema automatizado Chandler PVT 3000, indicando cada parámetro valores necesarios para determinar las propiedades físicas de la muestra a estudiar.

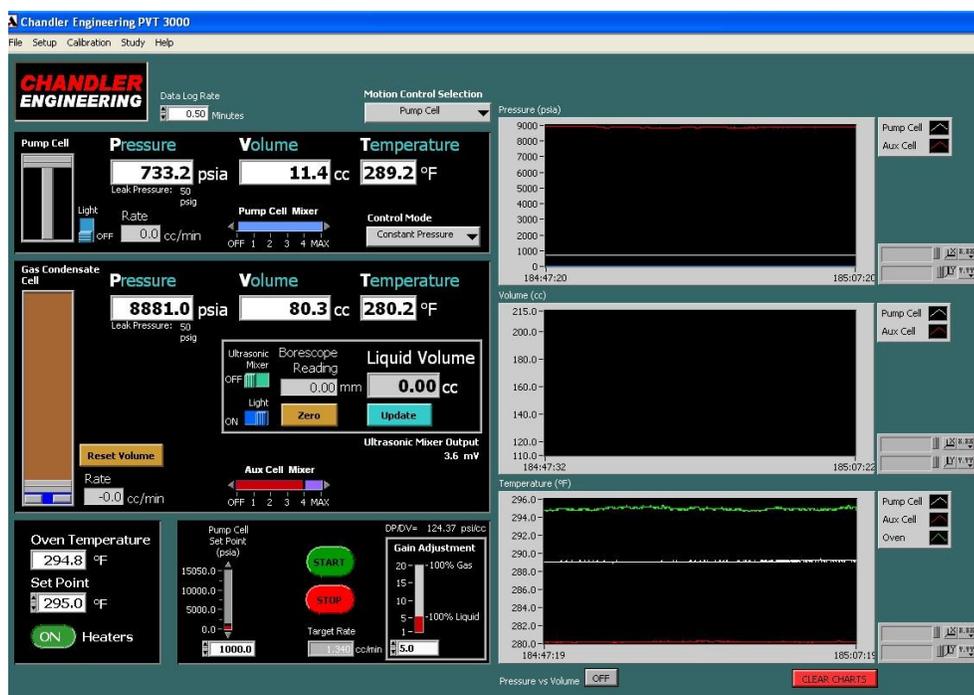


Figura 44. Pantalla principal del programa PVT 3000.

Fuente: (Chandler, 2009).

De acuerdo a la figura 44, se explica brevemente la pantalla principal del programa PVT 3000, que consta de la barra de menú (contiene cinco menús desplegables), las ventanas *Line temperature*, *Line pressure*, *Ambient temperature*, *Barometric Pressure*, el panel de control de la celda bomba, el panel de control de la celda auxiliar, los parámetros de control de movimiento, el panel de control de temperatura, y el panel de gráficos.

*Line Temperature*: Muestra la temperatura actual dentro de las líneas del sistema.

*Line Pressure*: Muestra la presión actual dentro de las líneas del sistema.

*Ambient Temperature*: Muestra la temperatura actual en el laboratorio.

*Barometric Pressure*: Muestra la temperatura barométrica en el laboratorio.

En la tabla 9, se reflejan las actividades que se presentan en la barra de menú.

Tabla 9. Ventanas de la barra de menú. (Chandler, 2008).

<b>Ventanas de la barra de menú</b>	
<b>Menú Archivo (File)</b>	Esta ventana le permite al usuario registrar los datos de un experimento a un archivo de datos registrados. Es posible seleccionar el proceso de registro en modo manual o automático. Aquí también es posible cerrar el software PVT 3000.
<b>Menú configuración (Setup)</b>	<p>A través de este menú se puede elegir lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar unidades para la presión y temperatura.</li> <li>• Definir límites para las alarmas del sistema.</li> <li>• Seleccionar la Celda Auxiliar a utilizar.</li> <li>• Seleccionar la bomba externa a utilizar.</li> <li>• Habilitar el transductor de la Celda Auxiliar.</li> <li>• Habilitar el Viscosímetro Capilar.</li> <li>• Habilitar el sistema de resonancia acústica.</li> <li>• Habilitar el densímetro externo.</li> <li>• Habilitar el viscosímetro electromagnético.</li> <li>• Habilitar la temperatura ambiente de RTD (artefacto de temperatura resistiva).</li> <li>• Habilitar el transductor de presión barométrica.</li> <li>• Configurar comunicaciones.</li> </ul>
<b>Menú calibración (Calibration)</b>	<p>Esta sección permite al usuario configurar diversos componentes y operaciones del sistema, que incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibración del transductor de presión de la Celda Bomba.</li> <li>• Calibración RTD de la Celda Bomba y Celda Auxiliar.</li> <li>• Tabla de compresión de sellado de la Celda Bomba y Celda Auxiliar.</li> <li>• Constantes de calibración de volumen de la Celda Bomba y Celda Auxiliar.</li> <li>• Calibración del transductor de presión de la Celda Bomba.</li> <li>• Tabla de compresión de sellado de volumen líquido de la Celda Auxiliar.</li> <li>• Transductor de fuga de presión.</li> <li>• Calibración de la presión barométrica.</li> <li>• Calibración de temperatura ambiente para sensor de RTD.</li> <li>• Calibración de línea de presión operacional del transductor.</li> <li>• Calibración de la línea de temperatura para sensor de RTD.</li> </ul>
<b>Menú Estudio (Study)</b>	En esta ventana puede iniciar los estudios PV (ECC o LD) de forma automática, estudio de viscosidad (usando el modulo opcional Viscosímetro Capilar) y estudio de densidad (usando el modulo opcional Densímetro).

#### 4.2.2.1 Panel de control de la Celda Bomba

En esta sección se muestra la presión, volumen y temperatura en la celda bomba. Estos valores son continuamente actualizados durante la prueba. En la figura 45 se muestra el panel de control de la celda bomba.

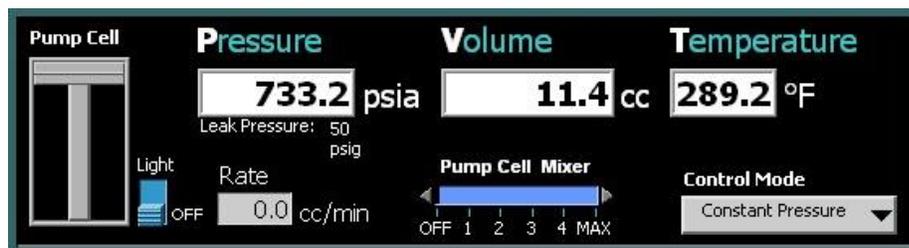


Figura 45. Panel de control de la Celda Bomba.

Fuente: (Chandler, 2009).

Control del agitador de la celda bomba (*Pump cell mixer*): La velocidad del agitador magnético es controlada en esta sección a través de la escala de la barra deslizante. La velocidad del agitador puede ser incrementada o disminuida como desee.

Modo de control de la celda bomba (*Control mode*): En este menú es posible seleccionar el modo de control de la celda bomba. Los diferentes modos de control de la celda bomba incluyen: (a) *Preset Increment*, (b) *Preset Absolute*, (c) *Jog*, (d) *Constant Pressure*, y (e) *Home*. A continuación en la tabla 10 se explican cada uno de ellos.

Tabla 10. Modos de control de la celda bomba. (Chandler 2009).

Modo	Función
<b>Presión Constante</b> <i>(Constant Pressure)</i>	Cuando el modo Presión Constante es seleccionado, la computadora controla el motor de accionamiento de la bomba para modificar el volumen de la celda, y de esta manera alcanzar el <i>Set Point</i> de presión deseado.
<b>Incremento Programado</b>	Cuando el modo incremento programado es seleccionado, el usuario puede especificar cambios de volumen incrementales exactos a una tasa de flujo volumétrica determinada (velocidad de la celda bomba).

<b>(Preset Increment)</b>	
<b>Absoluto Programado</b> <b>(Preset Absolute)</b>	Cuando el modo absoluto programado es seleccionado, el usuario puede controlar la bomba para moverla a una posición absoluta (volumen absoluto de la celda bomba) a una tasa de flujo volumétrica determinada (velocidad de la celda bomba).
<b>Mover</b> <b>(Jog)</b>	Cuando el modo mover es seleccionado, el movimiento de la bomba se inicia (presionando el botón <i>START</i> de la bomba) y el movimiento continua hasta que el usuario presione el botón <i>STOP</i> o la bomba alcance un límite en su trayectoria.
<b>Barrer</b> <b>(Sweep)</b>	Cuando el modo barrer es seleccionado, tanto la celda bomba como la bomba externa son activadas para funcionar simultáneamente. El fluido es “barrido” desde una celda a la otra de manera continua y a presión constante. El modo barrer sólo está disponible si una bomba externa de Chandler Engineering (Serie Digital-22xx o serie-Quizix Q6) es configurada con el sistema.
<b>Guiar</b> <b>(Home)</b>	El volumen de la celda bomba es determinado a partir de mediciones precisas de la posición del pistón. Perturbaciones eléctricas como una falla de energía pueden resultar en la pérdida de información de la posición. El modo guiar permite posicionar el pistón en el fondo de la celda en la posición de volumen máximo de la muestra y restablecer el volumen a un valor conocido, previamente calibrado.

Luz de visualización de la Celda Bomba (*Light*): La luz de visualización para la celda bomba es encendida y apagada a través del software usando el botón *ON / OFF*.

#### 4.2.2.2 Panel de control de la Celda Auxiliar

En esta sección se muestra la presión, volumen y temperatura en la celda auxiliar (celda de gas condensado). Estos valores son continuamente actualizados durante la prueba. En la figura 46 se muestra el panel de control de la celda de gas condensado.

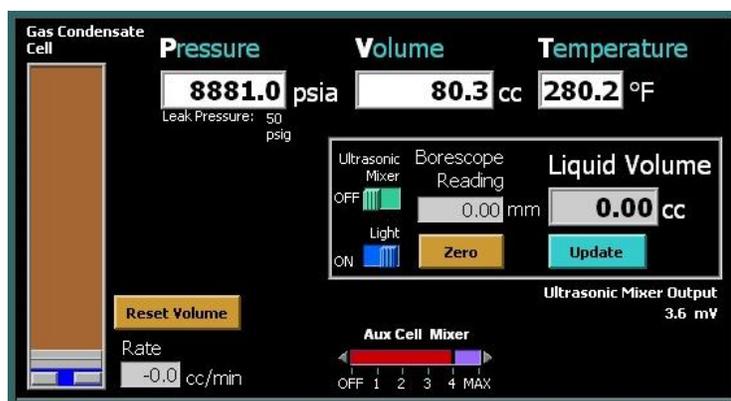


Figura 46. Panel de control de la Celda Auxiliar.

Fuente: (Chandler, 2009).

Control del agitador de la Celda Auxiliar (*Aux cell mixer*): La velocidad del agitador magnético es controlada en esta sección a través de la escala de la barra deslizante. La velocidad del agitador puede ser incrementada o disminuida como se desee.

Modo de control de la Celda Auxiliar (*Control mode*): Los modos de control disponibles en esta opción son dependientes de la selección de la celda auxiliar. El menú de modo de control de la celda auxiliar es desplegado sólo cuando la celda auxiliar es seleccionada en la sección control de movimiento de la pantalla principal.

Control del agitador ultrasónico (*Ultrasonic mixer*): El botón *ON / OFF* del agitador ultrasónico es utilizado para encender y apagar el agitador ultrasónico (acústico) de la celda de gas condensado. El dispositivo de agitación acústico utiliza energía acústica para perturbar la interfase gas/líquido.

Control del boroscopio (*Boroscope reading*): El boroscopio permite visualizar la interfase gas/líquido a través del curso de la prueba y puede ser desplazado verticalmente para medir el volumen de líquido condensado. El instrumento es operado manualmente durante el curso de la prueba.

### 4.2.2.3 Parámetros de control de movimiento

La sección de parámetros de control de movimiento de la pantalla principal cambiará dependiendo del modo de control que haya sido seleccionado. Los parámetros de control de movimiento le permiten al usuario ingresar tasas de flujo apropiadas, o *set-points* de presión, o cambio de volumen incremental, o volumen absoluto, dependiendo del modo de control seleccionado. La pantalla de control de movimiento se muestra en la figura 47.



Figura 47. Pantalla de control de movimiento (modo incremental).

Fuente: (Chandler, 2009).

### 4.2.2.4 Control de temperatura

El control de temperatura en el Sistema Chandler PVT 3000 es mantenido por un baño de aire de convección forzada (horno). Tiene una temperatura máxima de 400°F (204°C). La precisión de control es de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La temperatura mínima es aproximadamente 10°C (18°F) por encima de la temperatura de la habitación.

El controlador de temperatura está localizado físicamente en la sección inferior del Sistema Chandler PVT 3000. Está vinculado a la computadora del sistema, y para una normal operación, el control es manejado por el software, a través del teclado y el ratón. En la figura 48 se muestra el control de temperatura del software PVT 3000, localizado en la parte inferior izquierda de la pantalla principal.



Figura 48. Control de temperatura.

Fuente: (Chandler, 2009).

#### 4.2.2.5 Gráficas de datos

Cuatro gráficos diferentes pueden ser monitoreados en tiempo real durante la prueba. El botón *clear charts* en la esquina inferior derecha de la pantalla principal del programa permite despejar todos los datos de las gráficas. Los gráficos disponibles incluyen:

- Presión
- Volumen
- Temperatura
- Presión vs. Volumen

Para acceder al gráfico Presión vs. Volumen se debe presionar el botón “Presión vs. Volumen” en la parte inferior de la pantalla principal. El gráfico Presión vs. Volumen no puede ser visualizado al mismo tiempo que los gráficos individuales de Presión y Volumen.

#### 4.2.3. Gasómetro.

El gasómetro modelo 2331d está diseñado para realizar mediciones volumétricas precisas de gas atmosférico en el laboratorio. El dispositivo permite mediciones exactas con un mínimo de técnica, como si requieren los equipos utilizados antiguamente, tales como medidores de desplazamiento de mercurio, y buretas de gas.

El diseño del modelo 2331d consiste de dos compartimientos de 1000 cm<sup>3</sup> (cámara derecha), y 2000 cm<sup>3</sup> (cámara izquierda) cada uno, los cuales pueden ser usados separadamente o en serie para contener un volumen total de 3000 cm<sup>3</sup>. Cada cámara del instrumento contiene una bomba volumétrica atmosférica con el pistón conectado a un dispositivo de medición, que incluye una escala, un vernier, una perilla para el ajuste de la presión, y una pantalla digital que muestra valores de temperatura y presión (Chandler, 2014). En la figura 49 se muestra el gasómetro.



Figura 49. Gasómetro modelo 2331d.

El equipo dispone de las siguientes especificaciones:

- Presión máxima de trabajo: 50 pulgadas de agua (2 lpc).
- Error (medida de volumen de gas): 0.2% de la lectura diferencial de gas.
- Resolución: 0.1% de la escala total.
- Rango de temperatura de trabajo: 41°F a 104°F.

Algunas de las características principales se presentan a continuación:

- Tres gasómetros en uno.
- Diseño libre de mercurio.
- Compatibilidad con gases agrios.
- Medidores digitales para los volúmenes de gas.
- Vernieres para mediciones precisas de volumen.

Dimensiones físicas:

- Dimensiones (W x D x H) 13.31” x 7.69” x 40.31” / 33.81 cm x 19.53 cm x 102.4 cm.
- Peso: 50.5 lb / 20.9 kg.

**4.2.3.1 Descripción de interruptores y válvulas**

La figura 50 ofrece una representación esquemática del gasómetro. Cada componente se describe a continuación en la tabla 11.

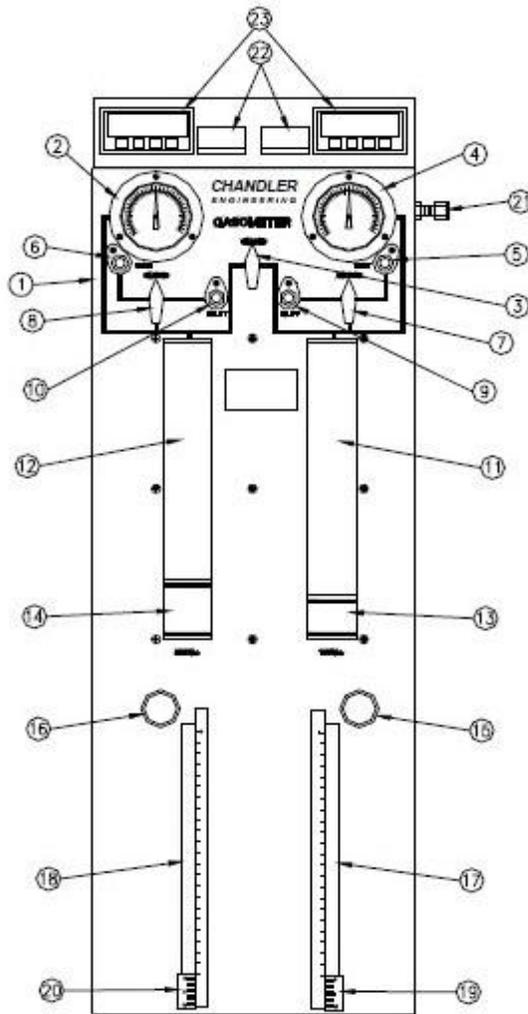


Figura 50. Esquema de funcionamiento del gasómetro 2331d.

Fuente: (Chandler, 2014).

Tabla 11. Componentes del gasómetro 2331d. (Chandler, 2014).

<b>Componentes Gasómetro 2331D</b>	
<b>Asas de transporte (1)</b>	Asas empotradas son provistas a ambos lados del instrumento para transporte.
<b>Manómetro (2 y 4)</b>	Un manómetro compuesto, 60" agua, 0-60" agua es provisto para encontrar la presión nula. El manómetro tiene tornillos de ajuste en la parte frontal para configurar el valor inicial nulo.
<b>Válvula de dos</b>	Esta válvula abre y cierra la línea que conecta los compartimientos de

<b>vias (3)</b>	1000 cc y 2000 cc. Cuando está en su posición cerrada, los compartimientos son aislados y pueden ser usados individualmente. En su posición abierta, los compartimientos están conectados y el volumen total es 3000 cc.
<b>Puertos de venteo (5 y 6)</b>	Estos puertos están conectados a los compartimientos de 1000 cc y 2000 cc a través de válvulas de tres vías individuales. Los puertos son usados para ventear sus respectivos compartimientos hacia la atmosfera o para transferir el gas colectado hacia otros instrumentos. Los puertos tienen una conexión Swagelok para tubería de ¼" OD.
<b>Válvula de tres vías (7 y 8)</b>	Estas válvulas conectan los compartimientos de 1000 cc y 2000 cc con el puerto de entrada o el puerto de venteo. Cuando está en su posición cerrada, el compartimiento está desconectado tanto del puerto de entrada como del puerto de venteo.
<b>Puertos de entrada (9 y 10)</b>	Estos puertos están conectados a los compartimientos de 1000 cc y 2000 cc a través de válvulas de tres vías individuales. La fuente de gas es conectada en estos puertos. Los puertos tienen una conexión Swagelok para tubería de ¼" OD.
<b>Compartimiento 1000 cc (11)</b>	Este compartimiento está hecho de tubería Pyrex de precisión con un diámetro interno (ID) de 2.7340".
<b>Compartimiento 2000 cc (12)</b>	Este compartimiento esta hecho de tubería Pyrex de precisión con un ID de 4.0000".
<b>Pistón (13 y 14)</b>	Ambos pistones (1000 cc y 2000 cc) están hechos de aluminio.
<b>Perilla (15 y 16)</b>	Las perillas permiten ajustar la presión nula en los compartimientos y están conectadas a los pistones a través de un piñón y cremallera.
<b>Escala (17 y 18)</b>	Estas escalas son para los compartimientos de 1000 cc y 2000 cc respectivamente. Para el compartimiento de 1000 cc, cada división secundaria representa 10 cc. Para el compartimiento de 2000 cc, cada división secundaria representa 20 cc.
<b>Vernier (19 y 20)</b>	Los vernieres tienen un total de diez divisiones. Al usar el vernier, el volumen total del compartimiento de 1000 cc puede ser determinado para un centímetro cubico y el compartimiento de 2000 cc puede ser determinado para dos centímetros cúbicos.
<b>Puerto válvula alivio (21)</b>	Este puerto está conectado del lado aguas abajo de la válvula de alivio de seguridad. Cuando la presión de entrada excede 2 lpc la válvula de alivio de seguridad se abre y ventea el gas por este puerto. El puerto debe estar conectado a una tubería de ¼" hacia un área de descarga segura.
<b>Pantalla digital de Temperatura (22)</b>	Este monitor muestra la temperatura del cilindro en °F.

<p><b>Pantalla digital de Volumen (23)</b></p>	<p>Este monitor muestra el desplazamiento de volumen en cm<sup>3</sup>. Puede ser usado para mejorar la precisión y repetitividad por sobre el mecanismo de escala y vernier.</p>
--	---

#### 4.2.4. Separador Flash.

El separador *flash* analiza los fluidos del yacimiento para medir las relaciones gas-petróleo, el factor volumétrico de formación y la gravedad del petróleo residual en función de la presión y la temperatura del separador. El instrumento permite la determinación de la relación gas-petróleo y la contracción por los métodos de liberación instantánea o vaporización. Esta información permite determinar las condiciones óptimas del separador (Chandler, 2009).

El modelo 2353 consta de dos cámaras separadoras; la primera cámara esta, equipada con una entrada de válvula de aguja micrométrica y una válvula de drenaje que conduce a un tubo receptor de la segunda etapa. La cámara de la primera etapa, con un volumen de 30 ml, se conecta a través de tubos y accesorios de acero inoxidable a un manómetro y un regulador de contrapresión (que se puede aislar con una válvula de corte) para controlar la presión del separador. Todo el sistema de presión está aislado de la atmósfera por una válvula adicional (Chandler, 2009).

Para experimentos de temperatura controlada, se proporciona una camisa de policarbonato alrededor de la cámara de separación de la primera etapa con conexiones de manguera de entrada y salida para hacer circular los fluidos de calefacción o enfriamiento alrededor de la cámara.

Para mayor comodidad, el separador de mesa se puede montar en un soporte de piso especialmente diseñado. El separador también se puede montar en la consola de pruebas de laboratorio opcional junto con un gasómetro modelo 2331D, un viscosímetro de bola de balanceo modelo 1602 y un sistema de vacío y colector adecuado para formar un Sistema de análisis integral. En la figura 51 se puede observar el separador *flash* de dos etapas fijado en la parte superior de su base de aluminio cuya parte inferior está diseñada para colocar el equipo de baño térmico, y

en la parte posterior de la misma se dispone de una base con correas para asegurar el cilindro portamuestra.



Figura 51. Separador flash.

Algunas de las características principales se presentan a continuación:

- Capacidad de flash de dos etapas.
- Chaqueta transparente para circulación de fluidos de calefacción o enfriamiento.
- Materiales mojados de muestra resistentes a la corrosión.
- Fácil de usar.

Especificaciones:

- Cámara de separación de la primera etapa, 500 lpc.
- Cámara de separación de la primera etapa, 500 lpc / 3.45 MPa.
- Válvula de alivio ajustada a aproximadamente: 660 lpc / 4.5 MPa.
- Válvula de alivio ajustada a aproximadamente: 25 lpc.

- Temperatura ambiente, 140 ° F / 60 ° C.
- Cámara separadora de la primera etapa, 200 ° F /Cámara separadora segunda etapa, 200 ° F.
- Cámara de separación de la primera etapa marcada con 0-30 ml.
- Tubo receptor de segunda etapa marcado 0-25 ml, en graduaciones de 0.2 ml.

#### 4.2.4.1 Descripción de conexiones, válvulas y componentes del separador

Las figuras 52 y 53 ofrecen una representación esquemática del separador flash. Cada componente se describe a continuación en la tabla 12.

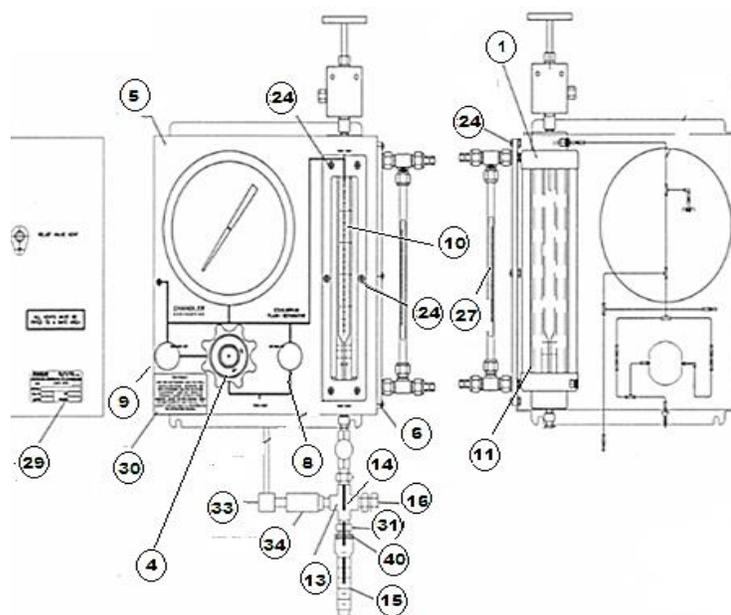


Figura 52. Esquema de funcionamiento del separador flash (vista frontal).

Fuente: (Chandler, 2009).

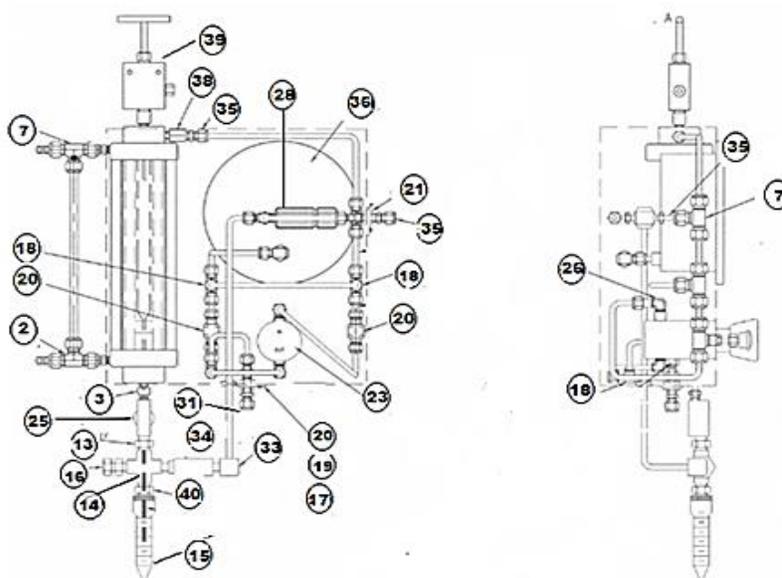


Figura 53. Esquema de funcionamiento del separador flash (vista dorsal).

Fuente: (Chandler, 2009).

Tabla 12. Componentes del separador flash 2353. (Chandler, 2009).

<b>Componentes del Separador Flash 2353</b>	
<b>Tubo conector (1)</b>	Permite fijar la primera cámara de separación
<b>“T” 3/8 NPT (2)</b>	Fija la base inferior que sirve de soporte al termómetro
<b>Conector 1/8” NPT (3)</b>	Conecta el tubo receptor del primer separador con el conector rápido que se une a su vez a la válvula 1/8 NPT.
<b>Perilla controladora de presión (4)</b>	Permite regular la presión que entra y sale a las cámaras de separación
<b>Chasis (5)</b>	Es la estructura rígida que le da el soporte al separador
<b>Costado Izquierdo de la ventana (6)</b>	Permite observar nivel de líquido en la cámara del primer separador

<b>SopORTE del termómetro (7)</b>	Asegura y mantiene en posición estable al termómetro
<b>Perilla de paso (BY PASS) (8)</b>	Permite el paso del fluido al regulador
<b>Regulador libre (REGULADOR OFF) (9)</b>	Permite el ingreso de fluido de una celda o cilindro al separador
<b>Protector (10)</b>	Protector del visor de la primera cámara de separación
<b>Tubo protector (11)</b>	Tubo de acrílico transparente que protege la cámara del primer separador; por el cual se pasa el fluido del baño
<b>Termómetro (12)</b>	Permite monitorear las temperaturas de los fluidos en las cámaras de los separadores
<b>Válvula de alivio (13)</b>	Se encuentra en la cruz que distribuye fluido en la segunda cámara, permite liberar residuos de H <sub>2</sub> S proveniente de la primera cámara
<b>Cruz ¼" SS (14)</b>	Permite conectar la válvula de alivio de H <sub>2</sub> S, el cilindro de la segunda cámara de separación y una conexión de ¼ "SS la cual sirve de extensión para conectar un vial u otro complemento
<b>Vial 25 ml (15)</b>	Recipiente receptor calibrado, representa la cámara del segundo separador
<b>Tornillo 3G (16)</b>	Permite fijar la platina de la cual sale el conector Swagelok que se conecta al cilindro
<b>Conector SS (17)</b>	Va unido a la cruz que se comunica con el cilindro de la segunda cámara separadora.
<b>"T" Monel (18)</b>	Facilita la unión de línea por el cual circula fluido que pasa por la válvula doble que regula el flujo de la primera cámara y también va unida a línea corta de 1,5" que se comunica a su vez con la línea que conduce al regulador de presión de la segunda cámara de separación.
<b>Tuerca SS (19)</b>	Permite fijar la platina de la cual sale el conector Swagelok que se conecta al cilindro

<b>Válvula de bloqueo</b> (20)	Tiene la función de interrumpir el flujo del gas al principio de su recorrido, proporcionando una separación de la fase líquida
<b>Conector</b> (21)	Conector hembra SS
<b>Vial</b> (22)	25 ml de capacidad, en el cual se encuentra el líquido en condiciones de superficie. Simula las condiciones de líquido en los tanques.
<b>Regulador</b> (23)	Se emplea para controlar la <i>presión</i> de entrada y de salida proveniente de las dos cámaras de separación (0-500 lpc)
<b>Tornillo BDG</b> (24)	Para fijar la placa protectora del cilindro de la primera cámara
<b>Conector rápido</b> (25)	Facilita conectar y desconectar de manera fácil y ligera la cruz que une a la segunda cámara del separador
<b>Codo ¼"</b> (26)	Va unido a línea de ¼" que entra al regulador de presión
<b>Termómetro</b> (27)	Mide la temperatura de los fluidos a condiciones atmosférica
<b>Válvula viton</b> (28)	Es una válvula de teflón diseñada para para retener el fluido en una línea tanto en sentido vertical como horizontal regula el flujo proveniente de la válvula doble del primer separador y regula a su vez el flujo que sale a la cámara del segundo separador
<b>Etiqueta</b> (29)	Indica : la presión, temperatura y volúmenes a la cual trabaja el equipo
<b>Placa de aviso</b> (30)	Establece los requerimientos eléctricos mínimo de funcionamiento del separador
<b>Niple SS ¼"</b> (31)	Facilita conexión del cilindro de la segunda etapa con la cruz de distribución de fluido.
<b>Conector SS ¼"</b> (32)	Permite conectar con un vial externo, se une internamente a una línea de ¼" que entra a un regulador interno del separador
<b>Codo cuadrado ¼"</b> (33)	Conecta la válvula de alivio que está unida a su vez a la cruz de la segunda cámara del separador con una de las válvulas que regula presión
<b>Válvula de alivio</b>	Se encuentra en la cruz que distribuye fluido en la segunda cámara y el codo cuadrado , permite liberar residuos de H2S

(34)	proveniente de la primera cámara de separación
<b>Conector 1/4" a 1/8"</b> (35)	Permite hacer una conexión a un vial o cilindro de menor diámetro externo al separador
<b>Manómetro</b> (36)	Utilizado para la medir la presión de fluidos que entran al separador Flash
<b>Conector</b> (37)	Permite conectar la línea con la válvula la cámara del primer separador
<b>Conector con rosca 1/4" FP</b> (38)	Permite conectar la línea que va a la cámara de la primera etapa de separación
<b>Válvula Flash</b> (FLASH VALVE) (39)	Permite el ingreso de la muestra proveniente de un cilindro o una celda PVT a el receptor de la primera cámara de separación; a su vez se conecta a una línea corta interna al separador que conlleva al fluido al conjunto de válvulas correspondiente al sistema de separación
<b>Conector de rosca</b> (40)	Esta hecho de teflón y permite enroscar el vial de la segunda cámara de separación

#### 4.2.5. Bombas Quizix.

Las bombas Quizix de aceite hidráulico son unas de las partes más importantes del sistema de equipos para análisis PVT de fluidos de yacimientos. Tienen una doble función: cambiar la presión en la celda auxiliar por inyección o retiro de aceite hidráulico y presurizar el cilindro portamuestra para la inyección del fluido a analizar. Se usan, en conjunto con las celdas contenidas en el horno, el separador *flash*, y el equipo de recombinación, etc.

Las bombas Quizix de la serie 6000 son bombas de alta presión que proveen un bombeo verdaderamente libre de pulso con una precisión y repetitividad sin igual. Estas bombas de desplazamiento positivo son ideales para manejar hidrocarburos, aceites refinados y gases como CO<sub>2</sub>.

Las bombas Quizix 6120 incluyen un par de cilindros que pueden funcionar de forma simultánea para un bombeo continuo por cualquier duración de tiempo, desde segundos hasta meses. Es posible bombear fluidos a una tasa de flujo constante o a una presión constante, especificando la tasa de flujo precisa o presión a ser mantenida. Las bombas 6120 también pueden funcionar en cualquier dirección, lo que le permite entregar o extraer fluido fácilmente desde una aplicación (Chandler, 2008). En la figura 54 se presentan las bombas Quizix 6120 y se indican sus partes.

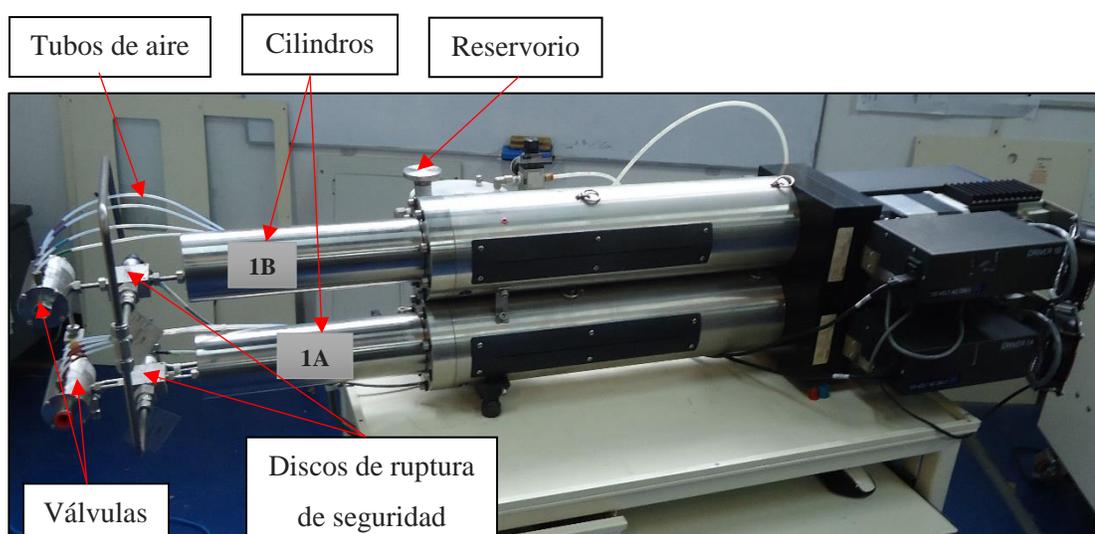


Figura 54. Bomba Quizix 6120.

Por cada cilindro, el sistema incluye una válvula de tres vías accionada por aire, dos solenoides piloto, y un transductor de presión.

Las válvulas de tres vías, usan un diseño en forma de T, de esta manera dentro de cada válvula de volumen constante hay una válvula de carga que controla el flujo de fluido hacia el cilindro y una válvula de entrega que controla el flujo de fluido fuera del cilindro. Cada válvula tiene una tubería de entrada en un extremo, una tubería de salida en el otro extremo, y una tubería que conduce al puerto central de la válvula y conecta con el cilindro (Chandler, 2008).

Los tubos de aire conducen el aire tomado en el sistema en el múltiple del solenoide piloto hasta las válvulas.

Los discos de ruptura de seguridad son instalados para prevenir que el sistema alcance altas presiones excesivas. Los discos de ruptura de seguridad son activados si hay una falla en el transductor de presión que no puede ser detectada por los sistemas de seguridad normales. También son activados en el poco probable escenario de una falla en el *hardware* o *software* donde el sistema no responda a los controles normales. En este caso, el disco de ruptura de seguridad protege a la bomba, tuberías, y componentes externos del daño debido a altas presiones excesivas. Si la presión especificada es excedida, el disco de ruptura de seguridad se rompe y el fluido es expelido a través del puerto de salida de fluido. Este puerto debe ser conectado mediante tubería para ventear el fluido hacia un área segura (Chandler, 2008).

Las características principales del sistema son las siguientes:

- El sistema de bombeo está diseñado para bombear fluidos a alta presión y ofrece un control preciso de la presión.
- Componentes electrónicos sofisticados proveen mediciones de tasas de flujo y volúmenes altamente precisas.
- El sistema es operado a través del software *PumpWorks*. El software le proporciona al usuario un control completo sobre todos los parámetros operativos.
- El sistema de bombeo puede ser operado en muchos modos operativos diferentes, incluyendo: (a) Tasa Constante, (b) Presión Constante, y (c) Presión Delta Constante.
- El sistema de bombeo es expandible y está diseñado para permitir al usuario añadir cilindros adicionales, a medida que las necesidades cambien.

Especificaciones:

- Presión máxima: 20000 lpc.
- Tasa de flujo máxima:  $100 \text{ mL}/\text{min}$ .
- Capacidad: 135 mL.
- Diámetro del pistón: 1”.

#### 4.2.5.1 Control de la bomba a través del software *PumpWorks*

En la figura 55 se presenta la ventana de Control y Datos de Bomba, también referida como ventana principal, la cual aparece en pantalla cuando el software *PumpWorks* es inicializado. La ventana principal es el núcleo de *PumpWorks* y muestra información y configuraciones importantes del sistema de bombeo de doble cilindro.

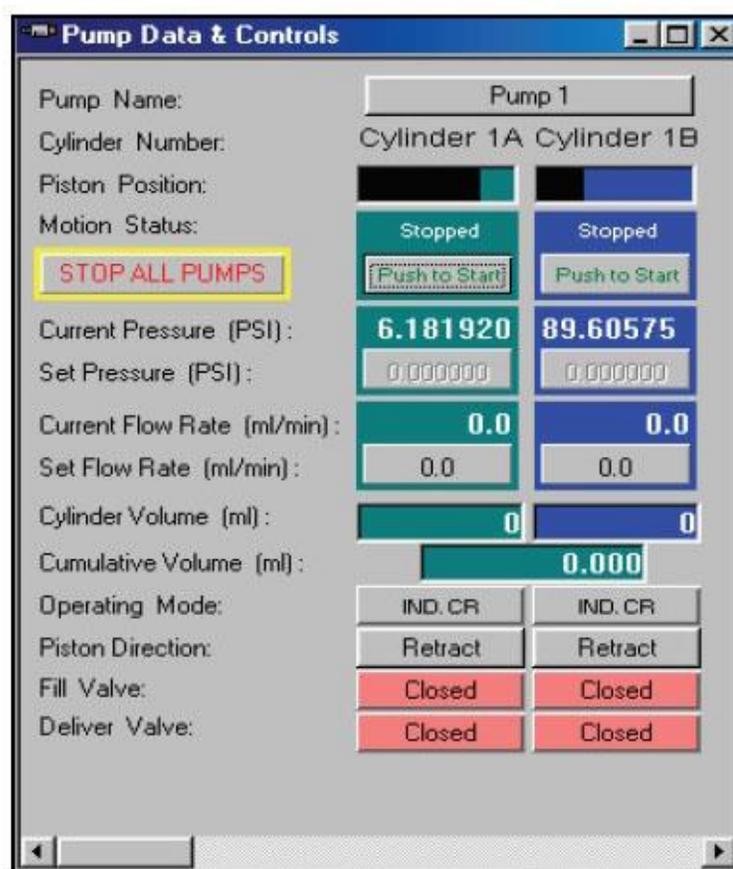


Figura 55. Ventana principal del programa PumpWorks.

Fuente: (Chandler, 2008).

La información disponible en la ventana de Control y Datos de Bomba se explica a continuación en la tabla 13.

Tabla 13. Ítems de la ventana Control y Datos de la Bomba. (Chandler,2008).

<b>Ítems de la ventana Control y Datos de Bomba</b>	
<b>Nombre de la bomba</b> ( <i>Pump Name</i> )	<i>PumpWorks</i> asigna un nombre por defecto a cada bomba. Estos nombres son Pump 1, Pump 2, y así sucesivamente. En esta sección, el usuario puede cambiar el nombre de las bombas según considere.
<b>Número de cilindro</b> ( <i>Cylinder Number</i> )	<i>PumpWorks</i> asigna una etiqueta a cada cilindro de la bomba. Las etiquetas por defecto son: Cylinder 1A y Cylinder 1B para Pump 1 y Cylinder 2A y Cylinder 2B para Pump 2. En esta sección el usuario puede cambiar el nombre de los cilindros.
<b>Posición del pistón</b> ( <i>Piston position</i> )	Este campo es una representación gráfica del movimiento de cada pistón de la bomba hacia adentro y hacia afuera del barril del cilindro. La porción negra de este campo representa el pistón; la porción verde o azul representa el fluido en el barril del cilindro.
<b>Estatus de movimiento</b> ( <i>Motion Status</i> )	En este campo se describe lo que cada pistón del cilindro de la bomba está haciendo en cualquier tiempo dado.
<b>Iniciar/Detener bombas</b> ( <i>Start/Stop Pumps</i> )	En lugar de detener individualmente cada cilindro operativo de la bomba, el usuario puede escoger detener todas las bombas operativas desde este campo.
<b>Presión actual</b> ( <i>Current Pressure</i> )	En este campo se muestra una medición de la presión actual dentro del barril del cilindro. Esta lectura es tomada del transductor de presión.
<b>Ajustar presión</b> ( <i>Set Pressure</i> )	Este campo le permite al usuario cambiar el ajuste previo de la presión de un cilindro de la bomba a un valor diferente.
<b>Tasa de flujo actual</b> ( <i>Current Flow Rate</i> )	En esta sección se muestra la tasa a la cual el cilindro de la bomba está extendiéndose o retractándose. La unidad por defecto para la tasa de flujo es mililitros por minuto (ml/min).
<b>Ajustar tasa de flujo</b> ( <i>Set Flow Rate</i> )	Este campo permite al usuario cambiar el ajuste previo de la tasa de flujo de un cilindro de la bomba a un valor diferente. La nueva tasa de flujo ingresada se convierte en la tasa de flujo a la cual el cilindro de la bomba operará. Cuando una tasa de flujo es cambiada, la bomba inmediatamente se ajusta a la nueva tasa de flujo configurada.
<b>Volumen cilindro</b> ( <i>Cylinder Volume</i> )	En este campo se muestra el volumen desplazado con respecto a la posición del pistón cuando el controlador haya sido encendido o cuando el volumen del cilindro haya sido reajustado. La unidad de medida por defecto para el volumen del cilindro es mililitros (ml).
<b>Volumen</b>	En este campo se muestra el volumen bombeado combinado para un par de cilindros. Esta información es válida sólo cuando los cilindros están

<p><b>acumulado</b> (<i>Cumulative Volume</i>)</p>	<p>operando en un modo emparejado, con un fluido continuamente bombeado por dos cilindros alternativamente.</p>
<p><b>Modo de operación</b> (<i>Operating Mode</i>)</p>	<p>El sistema de bombeo ofrece muchos modos de operación diferentes. Con la excepción de dos modos operativos que son usados para operaciones de recirculación solamente, cada modo de operación incluye las siguientes tres características:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Configuración del cilindro de la bomba.</li> <li>2. Método del cilindro de la bomba.</li> <li>3. Dirección del flujo de fluido.</li> </ol> <p>En este campo el usuario puede escoger uno de los modos operativos.</p>
<p><b>Dirección del pistón</b> (<i>Piston Direction</i>)</p>	<p>El modo de operación de tasa constante independiente, es el único modo de operación donde el usuario debe escoger y ajustar la dirección del pistón. Si dos cilindros están operativos, cada uno en modo tasa constante independiente, el usuario puede ajustar la dirección de cada cilindro de forma diferente o igual, cualquiera que sea la deseada.</p>
<p><b>Estatus válvula carga/entrega</b> (<i>Fill/Deliver Valve Status</i>)</p>	<p>Los colores de los botones de las válvulas de carga y entrega son codificados por el software <i>PumpWorks</i> como verde cuando la válvula está abierta y anaranjado/rojo cuando la válvula está cerrada. Para los modos operativos tasa constante independiente y presión constante, este campo le permite al usuario ajustar manualmente las válvulas para abrirlas o cerrarlas como desee. Para todos los otros modos operativos, las válvulas son abiertas o cerradas automáticamente, como se necesite, para una adecuada operación de la bomba.</p>

#### 4.2.5.2 Modos de operaciones de las bombas Quizix

El usuario puede seleccionar entre una amplia gama de modos de operación que están disponibles en el programa *PumpWorks* (Figura 56), comprender y elegir el modo de operación correcto es importante para lograr resultados satisfactorios. A continuación, se presentan en la tabla 14, el funcionamiento de cada uno de los modos de operación de las bombas.

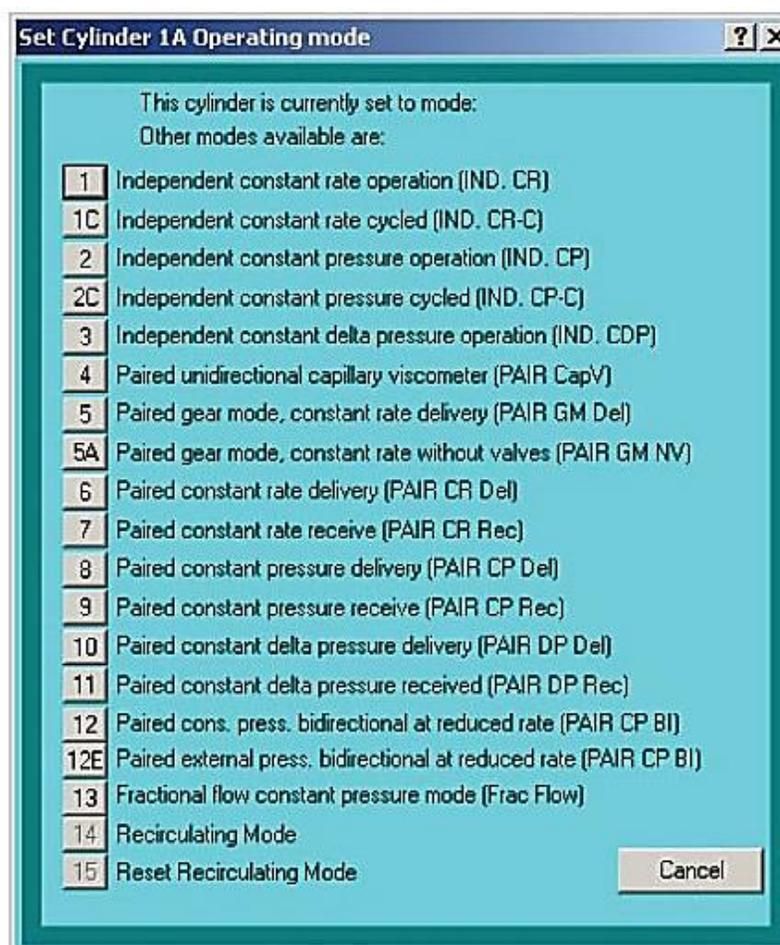


Figura 56. Modos de operación de la bomba Quizix.

Fuente: (Chandler, 2008).

Tabla 14. Modos de operación de las bombas. (Chandler 2008).

Modo	Función
(1) IND. CR	Bombear fluido a tasa constante con un cilindro en operación a la vez.
(1C) IND. CR-C	Bombear fluido con un cilindro a la vez, el cual circula automáticamente entre el llenado y la entrega del fluido.
(2) IND. CP	Bombear fluido a presión constante con un cilindro en operación a la vez.
(2C) IND. CP-C	Bombear fluido con un cilindro a la vez con presión constante entregando o recibiendo fluido mediante un ciclo.

<b>(3)</b> <b>IND. CDP</b>	Mantener el delta de presión en el sistema mediante la dirección del pistón, es decir, el pistón se extiende o se retracta tanto como sea necesario para mantener el delta de presión.
<b>(4)</b> <b>PAIR CapV</b>	Mantener la operación de los cilindros de las bombas en modo de trabajo similar, donde un cilindro de la bomba se extiende mientras que el otro se retracta conectados a un viscosímetro.
<b>(5)</b> <b>PAIR GM Del</b>	Mantener la operación de los cilindros de las bombas, uno se extiende y el otro se retrae continuamente para entregar fluido a una tasa de flujo constante en modo simultáneo.
<b>(5 A)</b> <b>PAIR GM NV</b>	Conservar el movimiento de los cilindros de las bombas mientras se extienden y se retractan continuamente para entregar fluido a un caudal de flujo constante establecido por el usuario. Este modo de operación es único porque las válvulas no están activas (no se encienden), es decir es útil para hacer pruebas dinámicas de fugas.
<b>(6)</b> <b>PAIR CR Del</b>	Conservar el movimiento de los cilindros de las bombas mientras giran continuamente suministrando fluido a una tasa constante establecida por el usuario. Entonces, mientras un cilindro se retracta (es decir, se llena de fluido), el otro cilindro descarga.
<b>(7)</b> <b>PAIR CR Rec</b>	Mantener el constante movimiento giratorio de las bombas inyectando fluido a una tasa constante establecida por el usuario tomando en cuenta que la presión del fluido puede variar y será configurada por la fuente que esté suministrando fluido a la bomba, considerando un modo de recepción de frecuencia constante emparejado.
<b>(8)</b> <b>PAIR CP Del</b>	Mantener el movimiento giratorio de las bombas inyectando fluido a una presión constante establecida por el usuario mientras un cilindro este activo el otro se encuentra inactivo para realizar su operación, bien sea extender o retractar.
<b>(9)</b> <b>PAIR CP Rec</b>	Conservar la presurización del sistema, mientras que los cilindros de las bombas se turnan continuamente para recibir fluido a una presión constante establecida por el usuario, considerando que mientras un cilindro se extiende el otro se retracta.
<b>(10)</b> <b>PAIR DP Del</b>	Conservar la presurización del sistema, mientras que los cilindros de las bombas se turnan continuamente para suministrar fluido a un diferencial de presión constante establecido por el usuario, considerando que mientras un cilindro se extiende el otro se retracta, requiriendo de esta manera la instalación de un transductor de presión.
<b>(11)</b> <b>PAIR DP Rec</b>	Conservar la presurización del sistema, mientras que los cilindros de las bombas se alternan continuamente para recibir fluido a un diferencial de presión constante, considerando que mientras un cilindro se extiende el otro se retracta, requiriendo de esta manera la instalación de un transductor de presión analógico.
<b>(12)</b> <b>PAIR CP BI</b>	Funciona a presión constante el cual cambia alternadamente de entregar a recibir fluido para mantener la presión deseada por el sistema.
<b>(12E)</b> <b>PAIR CP BI</b>	Mantener la presión constante utilizando una fuente de presión externa (a través de una señal de entrada analógica auxiliar) en lugar de la presión del cilindro.

<p><b>(13)</b> <b>Fraw Flow</b></p>	<p>Mantener las bombas operando en conjunto para mantener una presión constante, con cada bomba proporcionando una fracción de fluido especificada por el usuario, utilizando un transductor de presión como base para la operación del flujo fraccional.</p>
<p><b>(14)</b> <b>Recirculating</b></p>	<p>Mantener un caudal constante en un sistema experimental cerrado (volumen constante) mientras se mantiene la presión que sale del sistema. Este modo requiere un cilindro de bomba de compensación de presión adicional además del o los pares de cilindros de la bomba necesarios para operar ya que se puede recircular hasta tres fluidos usando 3, 5 o 7 cilindros en las bombas.</p>
<p><b>(15)</b> <b>Reset</b> <b>Recirculating</b></p>	<p>Inhabilita el modo de recirculación.</p>

#### 4.2.6. Celda de recombinación

La celda de recombinación es utilizada para recombinar el gas de reservorio de baja presión (gases separadores) con el petróleo del tanque de almacenamiento (o el líquido del separador) para obtener una muestra de fluido representativa del yacimiento. También se puede utilizar para almacenar muestras a la presión y temperatura del yacimiento.

El soporte fluctuante está equipado con un mecanismo oscilante motorizado para agitar y mezclar adecuadamente para obtener un fluido homogéneo. El soporte también está equipado con una manta de calefacción y un controlador de temperatura para calentar la celda a la temperatura deseada (generalmente la temperatura del yacimiento). El pistón flotante en la celda aísla el petróleo del depósito del fluido hidráulico utilizado para presurizarlo.

El objetivo de usar este equipo para recombinar es reconstruir el sistema de hidrocarburos en estado monofásico, para ello se comparan la relación gas-petróleo producido que se reporta del campo con la relación gas-petróleo medida durante la recombinación de las muestras, considerando que es exitosa la recombinación de muestras cuando estos dos datos son muy cercanos. Luego, la recombinación con esta celda tiene como finalidad asegurar la calidad de la muestra para un análisis de laboratorio posterior.

La celda de recombinación está diseñada para contener hasta 1500 cc de volumen de fluido y una presión de 10000 lpc (68.9 Mpa, 689 bar) hasta 400 °F (204°) con la cubierta de calefacción incluida. La base oscilante está equipada con un mecanismo motorizado de balanceo que agitará la celda aproximadamente 4 veces por minuto.

En la figura 57 se puede observar la celda de recombinación envuelta en una manta térmica, montada en su base de metal, la cual sirve a su vez de base para el motor eléctrico y el panel digital por el cual se monitorea la presión y temperatura cuando se recombinan los fluidos.



Figura 57. Celda de recombinación.

#### 4.2.7. Cilindro portamuestras.

El cilindro portamuestras es usado para almacenar muestras de fluidos a elevadas presiones hasta que sean requeridas en el laboratorio PVT para su análisis.

El cilindro está equipado con un pistón flotante, proporcionando una cámara para la muestra de fluido en un lado del pistón y una cámara para el fluido hidráulico en el otro lado para el desplazamiento y presurización del fluido usando una bomba

externa. Además, una bola interna permite la agitación de la muestra de fluido (Chandler, 2010).

Especificaciones:

- Máxima presión de operación: 103,4 MPa (15,000 lpc)
- Máxima presión diferencial: 34,5 MPa (5,000 lpc)
- Máxima temperatura de trabajo permisible: 204°C (400°F)
- Volumen del cilindro de muestras: 1000 cc, y 750 cc
- Peso: aproximadamente 22 Kg (48,5 lbs)

En la figura 58 se muestran los cilindros portamuestras de 1000 cc y 750 cc, donde se indican sus partes externas.



Figura 58. Cilindros portamuestras.

Cada válvula del cilindro está conformada por un puerto para conexión, y un disco de ruptura de seguridad para proteger al sistema en caso de alcanzar altas presiones excesivas.

Finalmente, en la figura 59 se presenta un corte transversal del cilindro, donde se pueden distinguir sus elementos internos.

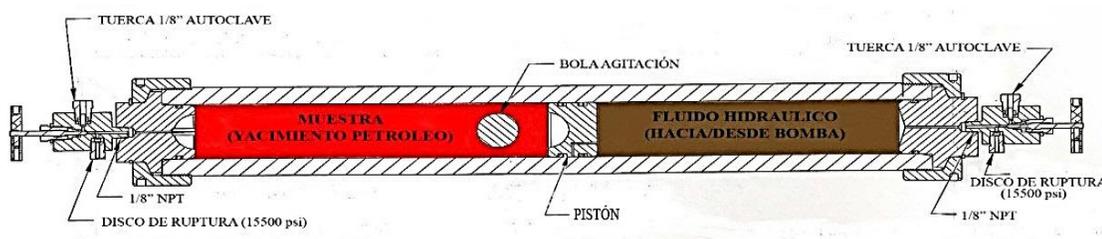


Figura 59. Vista transversal del cilindro portamuestras.

Fuente: (Chandler, 2010).

#### 4.2.8. Horno.

El horno ocupa la mayor parte del área total del sistema Chandler PVT 3000 y es utilizado para mantener una temperatura adecuada característica del yacimiento al momento de efectuar cualquiera de los estudios PVT que permitan determinar las propiedades requeridas de las muestras de hidrocarburos. El control de temperatura es mantenido por un baño de aire de convección forzada. El horno tiene una temperatura máxima de 400°F (204°C). La precisión del control de temperatura es  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . La temperatura mínima es aproximadamente 10°C (18°F) por sobre la temperatura del laboratorio.

Por otra parte, el horno está diseñado para alojar en su interior una serie de componentes que completan la función del sistema, estos son: (a) celda bomba, (b) celda auxiliar, (c) mini-celda, (d) viscosímetro capilar, (e) ARS, y (f) válvulas y tuberías.

Una representación esquemática de la configuración del horno es mostrada en la figura 60. En la figura, es posible observar la localización exacta de cada uno de los componentes dentro del horno, así como un sistema integrado de válvulas y tuberías, diseñado con el propósito de cargar y descargar la muestra de hidrocarburos con asistencia de la bomba Quizix. Las válvulas son de operación manual y la función de cada una de ellas es detallada en la tabla 15.

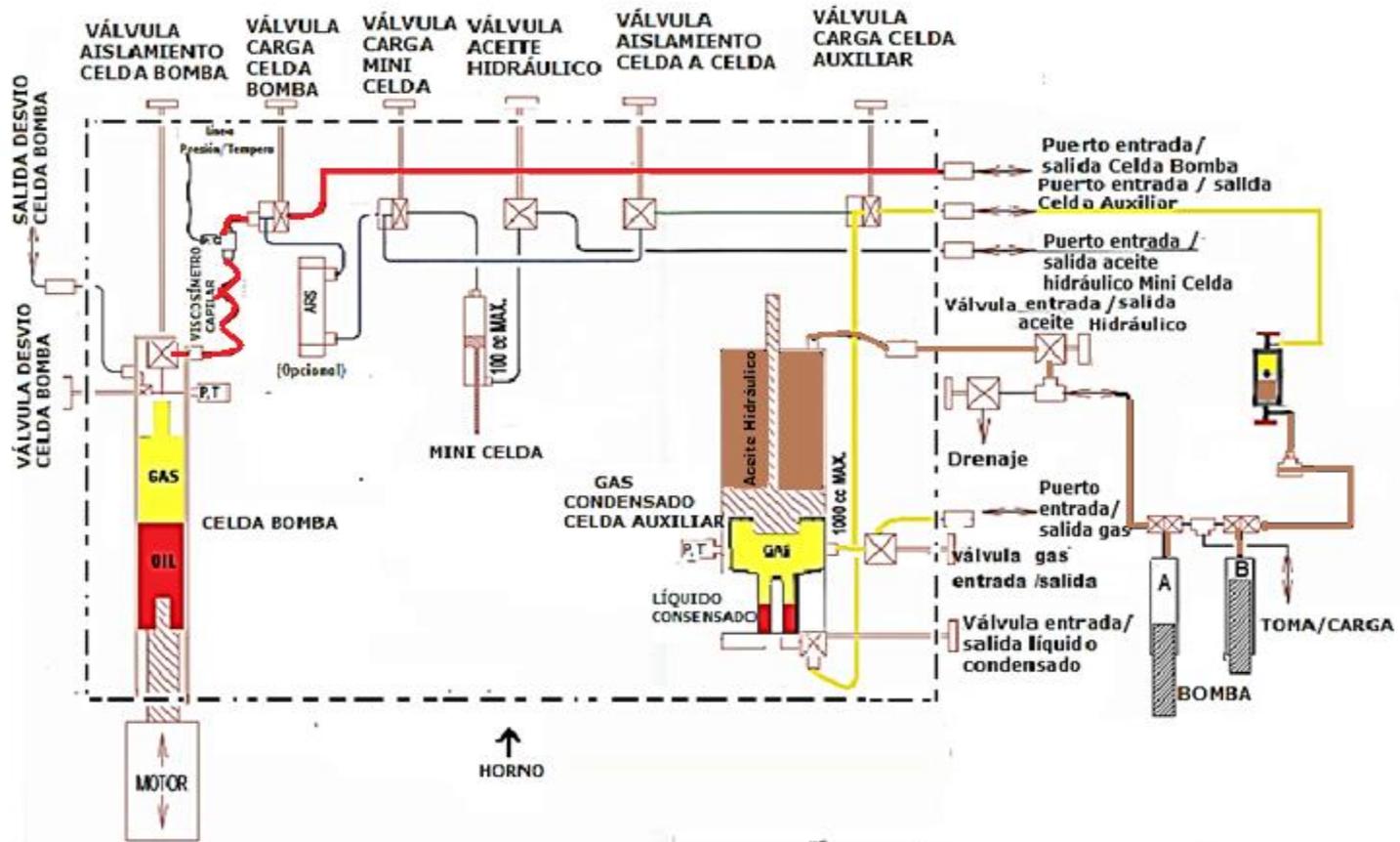


Figura 60. Diagrama de flujo del sistema Chandler PVT 3000.

Fuente: Chandler, (2009).

Tabla 15. Función de válvulas y puertos del horno. (Chandler, 2009).

<b>Ítem</b>	<b>Función</b>
<p><b>Válvula aislamiento celda bomba</b> <i>(Pump Cell Isolation Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para aislar la celda bomba del resto del sistema. Esta válvula debe estar cerrada cuando se estén realizando las pruebas en la celda bomba. Debe estar abierta para permitir al fluido fluir hacia o a través de cualquier otra válvula conectada a la celda bomba (excepto por la Válvula desvío Celda Bomba).</p>
<p><b>Válvula carga celda bomba</b> <i>(Pump Cell Charge Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para introducir la muestra de fluido hacia la celda bomba.</p>
<p><b>Válvula carga mini-celda</b> <i>(Mini Cell Charge Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para introducir fluidos hacia la mini-celda opcional.</p>
<p><b>Válvula aceite hidráulico mini-celda</b> <i>(Mini Cell Hydraulic Oil Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para introducir el aceite hidráulico hacia la mini-celda.</p>
<p><b>Válvula aislamiento celda a celda</b> <i>(Cell-To-Cell Isolation Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para aislar la celda bomba y la celda auxiliar una de otra.</p>
<p><b>Válvula carga celda auxiliar</b> <i>(Auxiliary Cell Charge Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para introducir la muestra de fluido hacia la celda auxiliar.</p>
<p><b>Válvula desvío celda bomba</b> <i>(Pump Cell Bypass Valve)</i></p>	<p>La válvula de desvío la de celda bomba es usada para purgar fluido desde la celda bomba. Es especialmente útil para ventear gas de muestras bifásicas petróleo-gas durante un experimento de liberación diferencial.</p>

<p><b>Válvula entrada/salida gas</b> <i>(Gas In/Out Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para ventear gas desde (o introducir gas hacia) la celda de gas condensado.</p>
<p><b>Válvula entrada/salida líquido condensado</b> <i>(Liquid Condensate In/Out Valve)</i></p>	<p>Esta válvula es usada para aislar la celda de gas condensado del resto del sistema para proceder con las pruebas. Cualquiera de las dos válvulas, esta o la válvula de aislamiento celda a celda deben ser cerradas siempre que la presión de la celda de gas condensado este por encima de 15000 lpca (137.9 MPa, 1379 bar). Esta válvula está asentada en la celda misma, con una extensión a través de la pared del horno a la manija en el exterior del horno.</p>
<p><b>Válvula entrada/salida aceite hidráulico</b> <i>(Hydraulic Oil In/Out Valve)</i></p>	<p>La bomba externa es conectada a esta válvula. La válvula es usada para cargar (llenar) la celda auxiliar (celda de gas condensado) con fluido hidráulico, y para posteriormente permitir al aceite hidráulico moverse hacia adentro y hacia afuera de la celda auxiliar y de esta manera controlar el movimiento del pistón flotante (el cual a su vez permite cambiar el volumen de la celda auxiliar).</p>
<p><b>Válvula de drenaje</b> <i>(Drain)</i></p>	<p>Esta válvula da una forma de T a la tubería entre la válvula de entrada/salida de aceite hidráulico y la bomba externa. Es usada para drenar el fluido hidráulico desde la celda auxiliar para permitir al pistón flotante moverse hacia arriba y disminuir la presión.</p>
<p><b>Puerto entrada/salida celda bomba</b> <i>(Pump Cell Charge In/Out)</i></p>	<p>Este puerto es utilizado para instalar una sección de tubería que conecte con el cilindro y permita introducir y retirar la muestra de fluido (petróleo negro o volátil) hacia/desde la celda bomba.</p>
<p><b>Puerto entrada/salida celda auxiliar</b> <i>(Auxiliary Cell Charge In/Out)</i></p>	<p>Este puerto es utilizado para instalar una sección de tubería que conecte con el cilindro de la bomba externa, y permita introducir la muestra de fluido (gas condensado) hacia la celda auxiliar.</p>
<p><b>Puerto entrada/salida aceite hidráulico mini-celda</b> <i>(Mini-Cell)</i></p>	<p>Este puerto es utilizado para instalar una sección de tubería que conecte con la bomba externa, y permita introducir y retirar el aceite hidráulico hacia/desde la mini-celda.</p>

<b>Hydraulic Oil In/Out)</b>	
<b>Puerto entrada/salida gas</b> <b>(Gas In/Out)</b>	Este puerto es utilizado para instalar una sección de tubería que conecte con el vial y gasómetro para permitir drenar la muestra de fluido desde la celda auxiliar hacia condiciones atmosféricas y medir su volumen. También se puede usar para instalar una sección de tubería que conecte con el cilindro y permita introducir la muestra de fluido hacia la celda auxiliar.
<b>Puerto salida celda bomba</b> <b>(Pump Cell Bypass In/Out)</b>	Este puerto es utilizado para instalar una sección de tubería que conecte con el vial y gasómetro para permitir drenar la muestra de fluido desde la celda bomba hacia condiciones atmosféricas y medir su volumen.

#### 4.2.8.1 Celda bomba

La celda donde se efectúa el estudio PVT para petróleo negro y petróleo volátil, consiste básicamente de un cuerpo cilíndrico hueco de acero inoxidable, con una capacidad de 400 cm<sup>3</sup> aproximadamente. La celda es capaz de manejar presiones de hasta 15000 lpc y temperaturas de 400°F (103,4 MPa a 204°C). Las presiones y volúmenes en la celda bomba son ajustadas por un pistón móvil especialmente diseñado en forma de un cono truncado; el vástago del pistón está acoplado a un tornillo sin fin y a un motor eléctrico. Una ventana visual de cristal de zafiro está localizada en el cabezal de la celda para permitir inspeccionar visualmente la interfase gas-petróleo y la formación de burbujas en el interior de la celda.

Para evitar una observación directa bajo altas presiones, un espejo y una luz de fibra óptica son montados en un collarín que esta sujetado alrededor del cabezal de la celda bomba; además, una cámara de video es ubicada en la parte externa del horno y dirigida hacia el visor a través del espejo. Con el fin de retener el fluido dentro de la celda, el cabezal de la celda bomba incluye tres juegos de sellos de tipo O-ring; uno para sellar el cabezal al cilindro y los otros dos para sellar alrededor de la ventana visual de cristal de zafiro.

La celda posee un diámetro de 1,741 pulgadas (4,42214 cm), y una altura de 10,4642 pulgadas (26,579 cm). En la figura 61 se muestra la celda bomba donde se puede distinguir el cuerpo de la celda y demás partes.

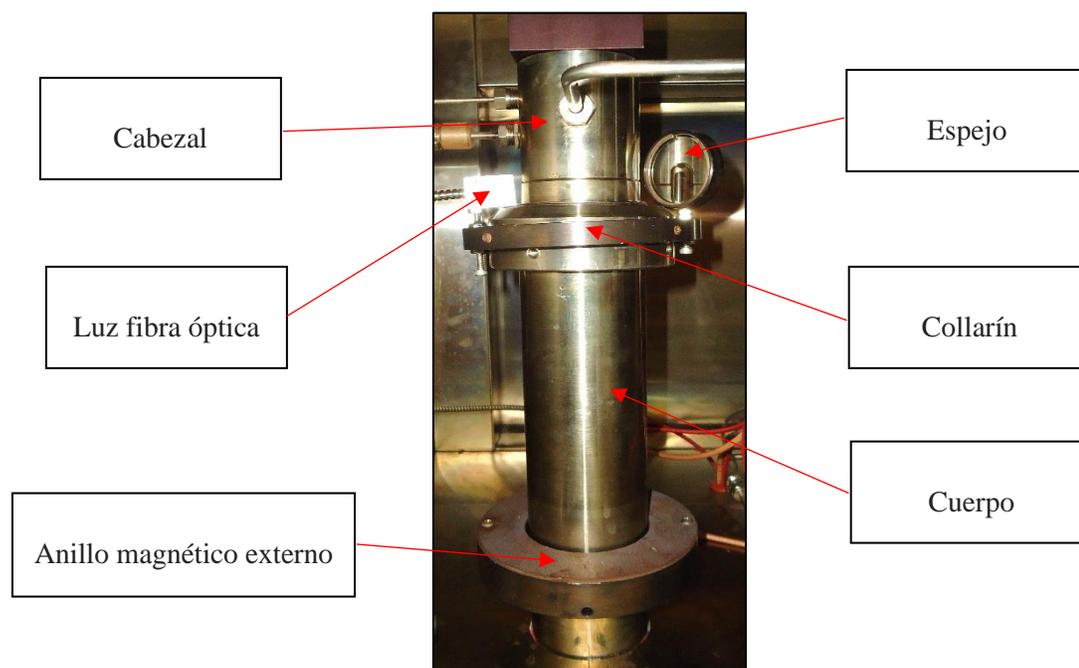


Figura 61. Celda bomba para estudios PVT en muestras de petróleo.

La presión en la celda bomba es medida automáticamente por un transductor de presión compensado por temperatura, localizado en el ensamblaje del cabezal, debajo de la válvula asentada (válvula aislamiento celda bomba), de esta manera, las mediciones son válidas así la válvula esté abierta o cerrada. El valor de la presión es mostrado en la pantalla del programa PVT 3000 y actualizado continuamente.

El volumen en la celda PVT se determina partiendo de una posición de referencia donde el volumen esté previamente calibrado de forma precisa (posición *Home*), para luego rastrear el movimiento del pistón a través de un codificador de incremento rotatorio montado en un dispositivo electrónico (servo motor). El sistema PVT 3000 utiliza interruptores y sensores para limitar el movimiento de la celda

bomba e identificar la posición de referencia para la calibración de volumen (Chandler, 2009).

La temperatura en la celda bomba es medida con un detector de resistencia térmica de platino (RTD), construido dentro del transductor de presión, el cual permite obtener una relación lineal conocida y repetible entre resistencia y temperatura. Este dispositivo está conectado a un controlador de temperatura, permitiendo al software PVT 3000 leer el valor de temperatura vía comunicaciones seriales (RS-232) con el controlador (Chandler, 2009).

Por otra parte, la celda bomba dispone de un sistema de agitación, constituido por un anillo magnético, el cual es desplazado verticalmente a través del fluido. El anillo está ubicado dentro de la celda y es acoplado magnéticamente a un anillo magnético externo (la pared de la celda está hecha de una aleación no magnética). Este magneto externo es conducido magnéticamente hacia arriba y hacia abajo por un motor de velocidad variable localizado en la parte externa inferior del horno. El motor de agitación es controlado a través de la computadora (Chandler, 2009).

Finalmente, en la figura 62 se presenta un corte transversal de la celda bomba donde se puede distinguir la ubicación de sus respectivos elementos, externos e internos. Estos elementos se describen en la tabla 16.

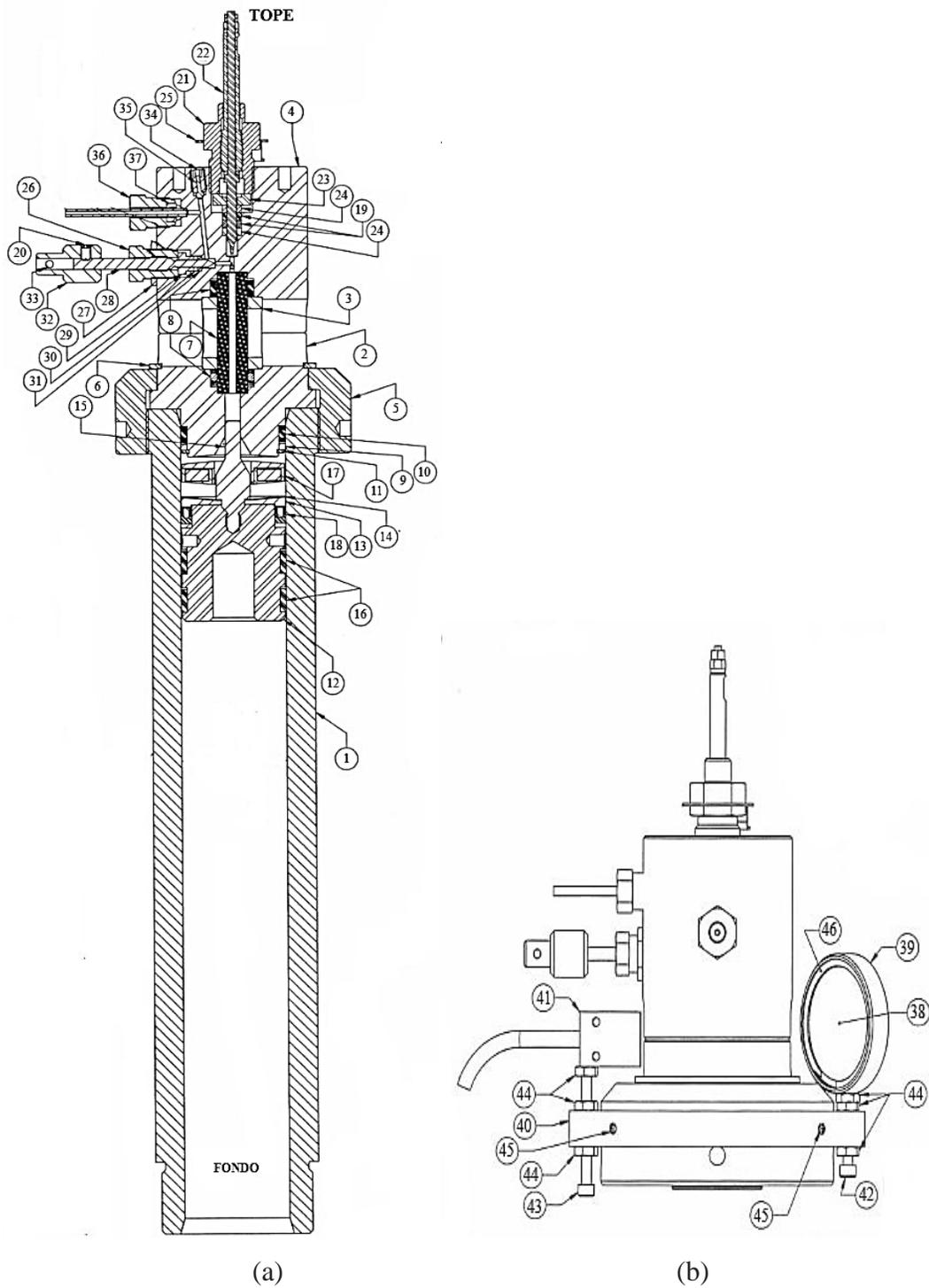


Figura 62. Vista transversal (a) celda bomba y (b) cabezal de la celda bomba.

Fuente: (Chandler, 2009).

Tabla 16. Descripción elementos de la celda bomba.

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>
(1)	Cilindro, 400 cc Celda Bomba.
(2)	Cabezal, mitad inferior.
(3)	Cabezal, parte media.
(4)	Cabezal, mitad superior.
(5)	Tapa de retención.
(6)	Anillo, retenedor.
(7)	Ventana visual de cristal de zafiro.
(8)	Sellos (o-ring y pista).
(9)	Anillo, retenedor.
(10)	Sello.
(11)	Anillo, retenedor, acero inoxidable (SS).
(12)	Cuerpo del pistón, Celda Bomba.
(13)	Tope del pistón, Celda Bomba.
(14)	Lavador.
(15)	Llenador, cabezal Celda Bomba.
(16)	Soporte, Celda Bomba.
(17)	Anillo magnético interno.
(18)	Sello.
(19)	Lavador, empaadura.
(20)	Lavador, plano.
(21)	Tuerca, empaadura.
(22)	Vástago.

(23)	Lavador de respaldo.
(24)	Lavador empacadura.
(25)	Tuerca, retenedor.
(26)	Tuerca del vástago para válvula HF2.
(27)	Tuerca bloqueo del vástago para válvula HF2.
(28)	Vástago, válvula HF2.
(29)	Lavador, tope, válvula HF2.
(30)	Empacadura en V.
(31)	Lavador, fondo, válvula HF2.
(32)	Acoplamiento, válvula manual, macho.
(33)	Pasador guía, SS.
(34)	Tuerca, gland, AF1 especial.
(35)	Conector 1/16" HIP.
(36)	Tuerca, gland, AF2.
(37)	Férula (camisa) AF2.
(38)	Espejo.
(39)	Cubierta-espejo.
(40)	Collarín-montura espejo.
(41)	Luz guía, modificada.
(42)	Tornillo, SS, Allen.
(43)	Tornillo, SS, Allen.
(44)	Tuerca, hexagonal, SS.
(45)	Tornillo, plano.
(46)	Anillo, retenedor, SS.

#### 4.2.8.2 Celda auxiliar

En la celda auxiliar o celda de gas condensado se llevan a cabo estudios PVT para gas condensado, consiste básicamente de un cuerpo cilíndrico hueco con un pistón flotante de acero inoxidable, con una capacidad de 1000 cm<sup>3</sup> aproximadamente. La celda es capaz de manejar presiones de hasta 20000 lpc y temperaturas de 400°F (137,9 MPa a 204°C). Las presiones y volúmenes en la celda auxiliar son ajustadas por el movimiento vertical de un pistón flotante el cual es accionado por la inyección de un fluido incompresible generalmente de naturaleza hidráulica; esta inyección se lleva a cabo por la parte superior de la misma, a partir de una bomba volumétrica de desplazamiento positivo.

La celda posee un diámetro de 6,667 cm y una altura de 32,46 cm, y un peso de 89 libras o 40 Kg. La figura 63 muestra la celda de gas condensado.

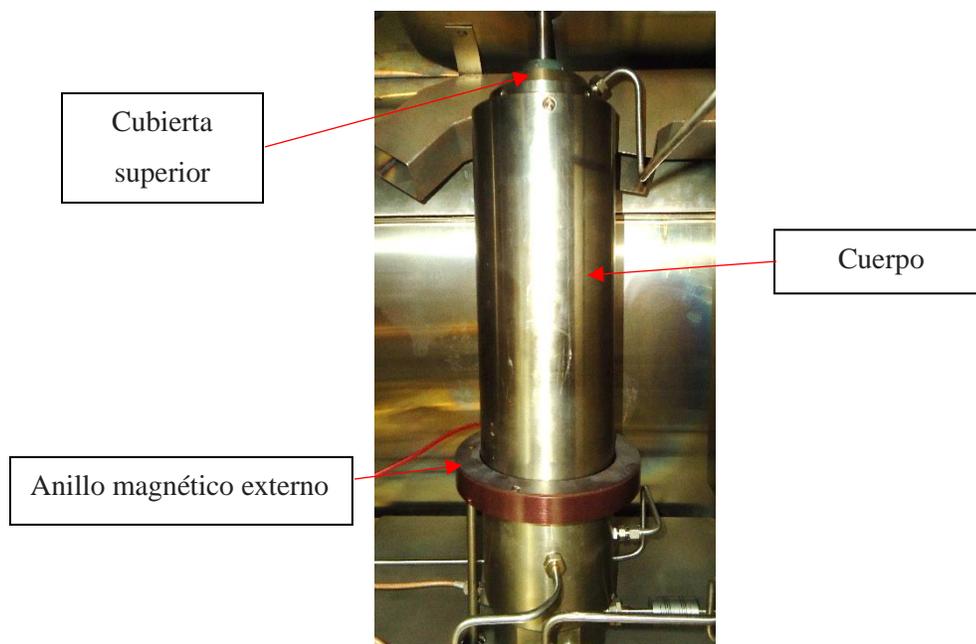


Figura 63. Celda de gas condensado (celda auxiliar).

La celda auxiliar está equipada con un boroscopio, instrumento que permite al analista visualizar los cambios termodinámicos que experimenta el fluido en el interior de la celda, así como medir el volumen de líquido retrógrado generado por la disminución de presión. El boroscopio consiste de una cámara ubicada en la sección interna e inferior de la celda auxiliar, la cual proporciona una visibilidad del volumen total de líquido retrógrado formado (aproximadamente 46 cc). La visibilidad de las imágenes arrojadas en tiempo real por el boroscopio puede ser dirigidas manualmente a través de esta sección de la celda al ser girada hacia cualquiera de ambos sentidos (horario o anti horario) una manivela, que le proporciona una visibilidad con movimiento vertical; dicha manivela está ubicada en la parte frontal del sistema Chandler PVT 3000.

Las imágenes arrojadas por el boroscopio son captadas por el operador a través de un monitor como el que se muestra en la figura 64; esta es una pantalla adicional, la cual está conectada al panel de control; este volumen de líquido retrógrado puede ser obtenido y contabilizado electrónicamente (a partir del panel de control de la celda auxiliar en el software PVT 3000) y visualizarse tomando como referencia una marca (sellos de la celda) en las paredes internas de esta sección de la celda, en el cual mediante el software se puede fijar el punto cero de referencia, a partir del cual se inicia la medición de este volumen una vez alcanzado el momento pertinente de la formación del mismo .

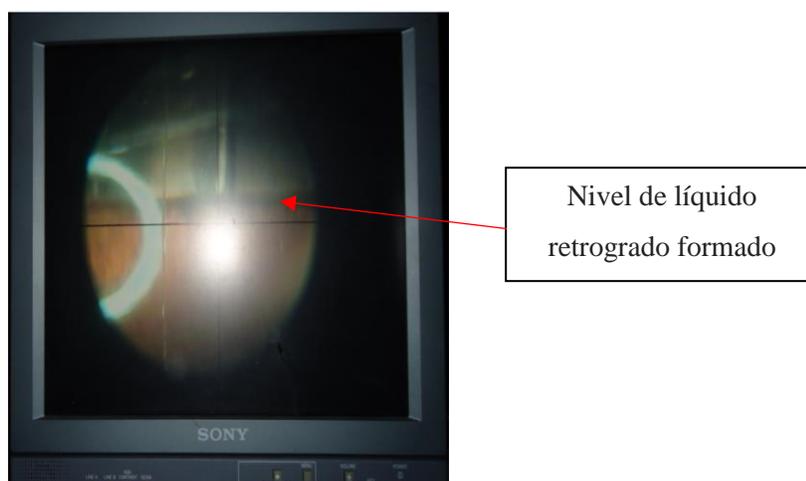


Figura 64. Monitor del boroscopio de la celda auxiliar.

El pistón flotante de la celda auxiliar cuenta con una guía; la cual se encuentra en la zona del fluido hidráulico, esta permite que el pistón permanezca perpendicular al cilindro; a medida que sube el pistón y se encuentra lleno de muestra sube esta guía y se puede visualizar como la parte superior de esta guía sobresale unos centímetros por encima del sistema Chandler PVT 3000. Cuando el pistón está vacío y se encuentra en la parte del fondo de la celda, esta guía baja.

La presión en la celda de gas condensado es medida automáticamente por un transductor de presión compensado por temperatura, localizado en la parte inferior de esta celda; el valor de esta presión obtenida es mostrado en la pantalla del software PVT 3000 y actualizado continuamente a medida que se ejecuta cada prueba.

Por otra parte las mediciones de volumen en la celda auxiliar se lleva a cabo de manera similar a la celda bomba, consiste en establecer un volumen mínimo o máximo previamente calibrado y conocido, posteriormente el cambio de este volumen se mide a través de un codificador incremental lineal conectado a una extensión del vástago de esta celda (Chandler, 2009).

La temperatura de la celda auxiliar se mide mediante un dispositivo calibrado de temperatura resistiva (RTD), incorporado en el transductor de presión de la celda auxiliar, que está conectado al módulo de adquisición de datos de entrada RTD (*Fieldpoint*) / módulo de comunicaciones, y el programa PVT3000 lee esta temperatura a través de comunicaciones *ethernet* con el controlador de este módulo.

La temperatura ambiente se mide mediante un RDT montado en la base del sistema PVT, fuera del horno, que está conectado a los datos de entrada de RTD (*Fieldpoint*), (Chandler, 2009).

La celda auxiliar dispone de un sistema de agitación, constituido por un anillo magnético el cual es movido hacia arriba y hacia abajo a través del fluido; este anillo es acoplado magnéticamente a un anillo magnético externo (la pared de la celda está hecha de una aleación no magnética), (Chandler, 2009).

Adicionalmente, la celda está equipada con un agitador ultrasónico (acústico) que le permite agitar la interfaz gas-líquido. Esto es especialmente útil cuando se trata de comprimir dos fases en una, ya que el área de superficie para el transporte de masa

y energía aumenta considerablemente. El dispositivo de mezcla acústica utiliza energía acústica para alterar el límite de fase. Se controla con el mezclador ultrasónico ubicado en el panel de control de la celda auxiliar. No es necesario ajustar la frecuencia de la señal de entrada, se sintoniza automáticamente. La señal de salida del mezclador ultrasónico puede variar mucho con la presión y la temperatura, (Chandler, 2009).

Finalmente, en la figura 65 se presenta un corte transversal de la celda de gas condensado; donde se puede apreciar la ubicación de sus respectivos elementos. Estos elementos se describen en la tabla 17.

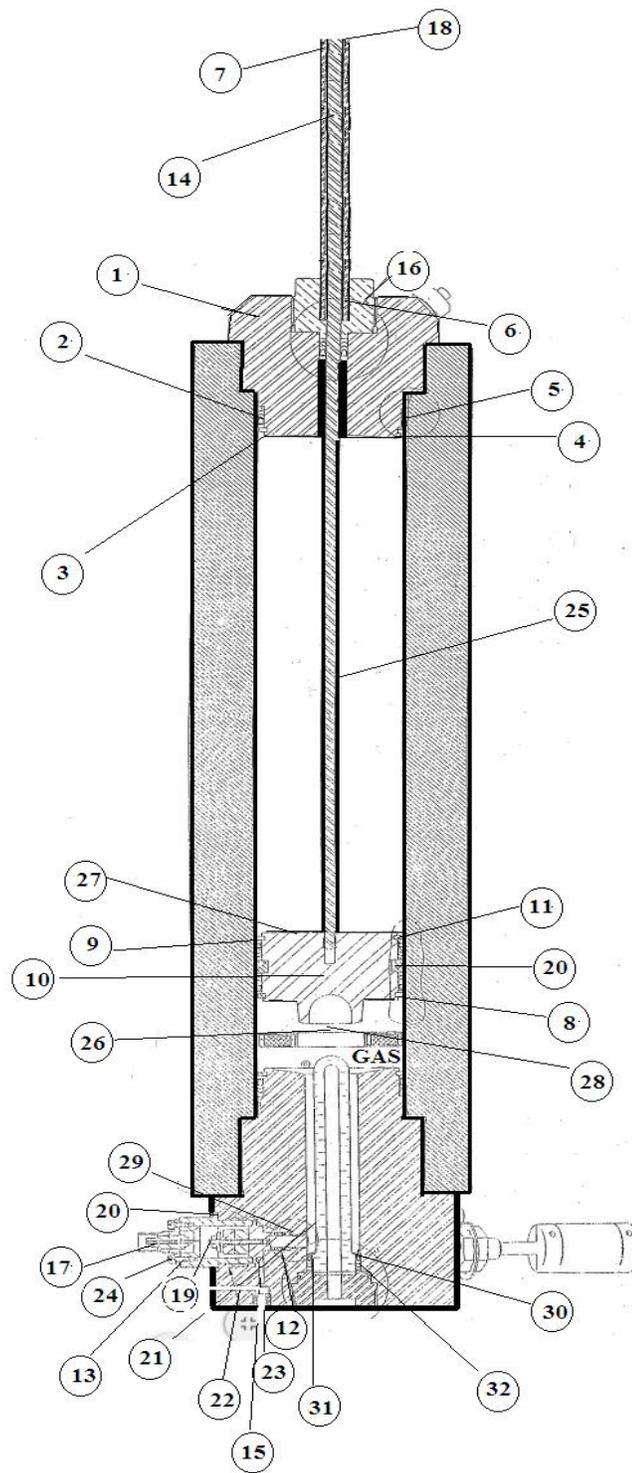


Figura 65. Vista transversal de la celda de gas condensado.

Fuente: (Chandler, 2009).

Tabla 17. Elementos de la celda de gas condensado. (Chandler, 2009).

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>
(1)	Contenedor de gas condensado
(2)	Retenedor
(3)	Sellos de seguridad 2,4x2,62 SMGL
(4)	Barra del pistón
(5)	Conjunto de sellos
(6)	sellos
(7)	Soporte del tubo del transductor
(8)	Anillo retenedor
(9)	Sello
(10)	Pistón de la celda
(11)	O-ring de Viton
(12)	Sellos 0,243x0,368
(13)	Ensamblaje acústico
(14)	Guía del pistón
(15)	Conector 1/16"
(16)	Base del riel
(17)	Tornillo 6-32x75 SST
(18)	Rodadura tope del transductor
(19)	Conector, retenedor
(20)	Sello dual 2,4x2,6
(21)	Ventana de cuarzo
(22)	Hoyo de alivio

(23)	Conector 1/16" NPT
(24)	Agitador acústico
(25)	Vástago del pistón
(26)	Anillo magnético interno
(27)	Borde superior del pistón
(28)	Borde inferior del pistón
(29)	Sello 0,243x0,368
(30)	Sello 0,775x0,900
(31)	Arandela
(32)	Retenedor

#### 4.2.8.3 Mini celda

La mini celda es una celda de poca capacidad volumétrica que contiene un pistón flotante el cual es accionado por un fluido hidráulico; es empleada como celda auxiliar en aplicaciones muy específicas, como las siguientes: (a) Prueba de precipitación de asfáltenos, (b) prueba de recombinación, (c) prueba de hinchamiento, y (d) prueba de múltiple contacto.

Esta celda se caracteriza por poder operar simultáneamente con otras celdas del sistema PVT; como en los estudios de recuperación mejorada, cuando se llevan a cabo pruebas de asfáltenos, surfactantes y polímeros (ASP), y al ser inyectados volúmenes específicos de aditivos químicos a partir de la mini celda a la celda bomba para lograr la precipitación de asfáltenos.

Por otra parte, la celda también se utiliza en estudios de múltiple contacto, cuando a partir de la mini celda se inyecta gas a la celda bomba con el objetivo de tener una noción de cómo se comporta el equilibrio de fases cerca de un pozo inyector de gas.

La celda puede trabajar con una presión máxima de 15000 lpc a temperatura máxima de 400°F y a un volumen de 100 cc. En la figura 66 se puede observar la

mini celda en el horno del sistema Chandler PVT 3000 con sus respectivas líneas de conexiones.

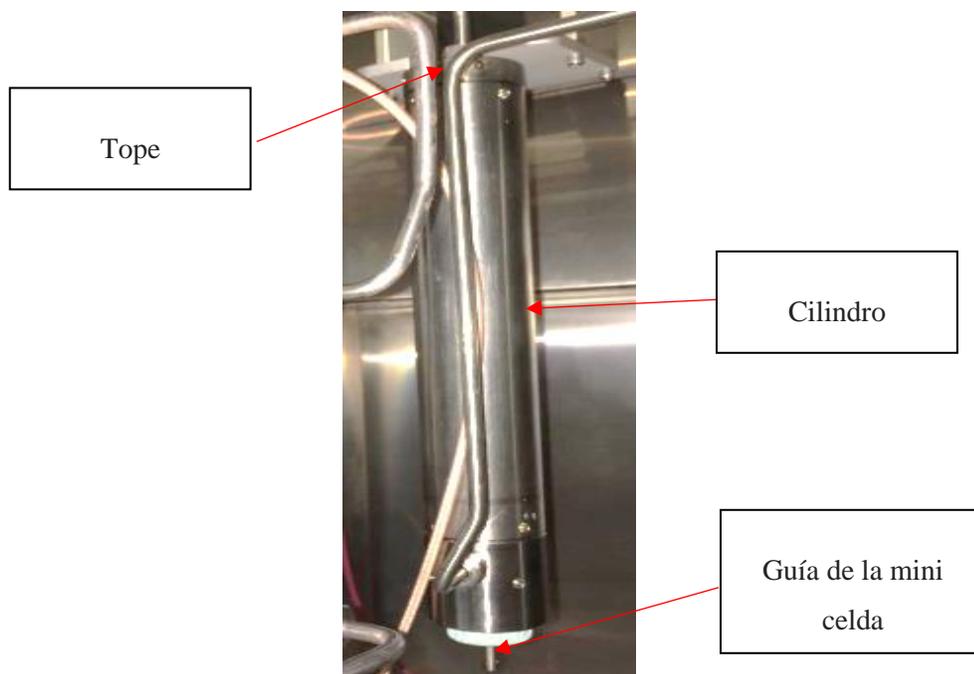


Figura 66. Mini celda.

#### 4.2.8.4 Sistema de resonancia acústica (ARS)

El modelo SPR-105 ARS es un sistema de detección de sólidos, el cual representa un módulo opcional como parte del sistema Chandler PVT 3000; se utiliza para detectar sólidos (como asfáltenos y ceras) en mezclas de petróleo a altas presiones y temperaturas. Esta herramienta utiliza una pequeña celda de medición especial de bajo volumen que se inserta en la línea del sistema Chandler PVT 3000, entre la celda bomba y la celda auxiliar. Normalmente una de las tres variables PVT se mantiene constante.

Esta herramienta utiliza la detención de resonancia acústica para detectar la floculación, precipitación, formación de sólidos como asfáltenos y ceras, a medida que el fluido de la celda de petróleo se bombea de un lado al otro entre la celda bomba y la celda auxiliar (Chandler, 2008). En la figura 67 se puede apreciar la celda ARS instalada en el horno del sistema Chandler PVT 3000.

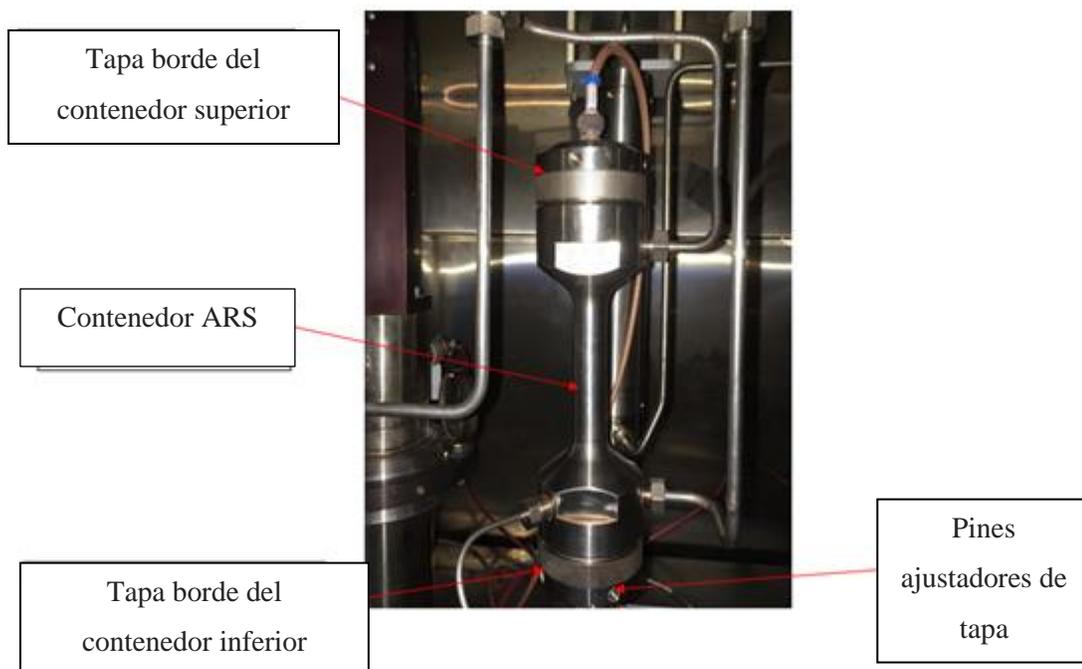


Figura 67. Celda ARS.

Algunas de las características principales se presentan a continuación:

- Es un módulo opcional para el sistema PVT 3000.
- Permite la detección de sólidos como asfáltenos y cera.
- Utiliza el hardware y software del sistema Chandler PVT 3000 para realizar mediciones.
- Hecho de material resistente a la corrosión causada por el  $H_2S$ .
- Presenta un registro automático de datos en el mismo software del sistema Chandler PVT 3000.

#### Especificaciones

- Máxima presión de operación: 25000 lpcá (137,9 MPa, 1379 bar).
- Máxima temperatura de operación: 218°C (425°F).
- Sensor de volumen interno de fluido: aproximadamente 5,5 cc.
- Materiales húmedos del sensor de la celda: A-286 SS, con fluorocarbono (Viton o similar) sellos.

- Conexión de presión (entrada de fluido/puerto de salida) en la celda del sensor: “HIP” hembra para ¼”-OD, alta presión, con y rosca (igual que autoclave Eng).F250C, NBS ¼”, Amico súper presión ¼” HP, Butech ¼ HP).
- Requerimientos de energía eléctrica: 85-264-VAC, 47-63-Hz, 1 fase, 0,5 A (toma corriente del mismo cableado existente de donde el modelo PVT 3000 está instalado).
- Dimensiones del sensor de la celda: aproximadamente 2,375” (6,03 cm) de diámetro por 10,35” (26,3cm) de longitud.
- Peso del sensor de la celda: aproximadamente 6,4 libras (2,9 kg).
- Dimensiones de la placa electrónica: aproximadamente 24,8” (63cm) Hx6.3 (16cm) Wx6” (15cm) de diámetro.
- Peso del instrumento completo: a aproximadamente 20 libras. (1,14 kg).
- Dimensiones completa: aproximadamente 18” H x 18” W x 10” D (46 cm Hx46 cm W x 46 cm D).

La figura 68 ofrece una representación esquemática de la celda ARS. Cada componente se describe a continuación en la tabla 18.

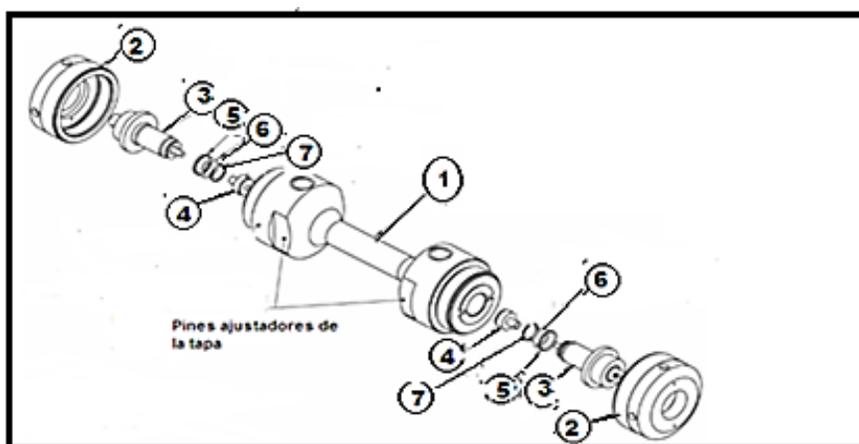


Figura 68. Esquema de funcionamiento de ARS.

Tabla 18. Partes del sistema de resonancia acústica (ARS). (Chandler, 2009).

Ítem	Descripción
(1)	Contenedor ARS
(2)	Tapa borde del contenedor
(3)	Transmisor
(4)	Conector del contenedor
(5)	Sello, anillo
(6)	O-ring
(7)	Retén

#### 4.2.8.5 Viscosímetro capilar

El viscosímetro capilar se basa en la Ley Hagen-Poiseuille, la ecuación empleada se modifica ligeramente con un parámetro empírico conocido como "factor de bobina",  $K_v$ . Este factor se calibra para cada capilar con fluidos de viscosidad conocida (Chandler, 2009).

Esta ley permite determinar el flujo laminar estacionario de un líquido incompresible y uniformemente viscoso a través de un tubo capilar cilíndrico de sección circular constante; fabricados de aleaciones de acero inoxidable capaces de soportar altas condiciones de presión y temperaturas; con diámetros interno de: 0,15 pulgadas y 0,27 pulgadas y con longitudes entre: 144 pulgadas, 60 pulgadas y 36 pulgadas. Aunque los espacios porosos de las rocas no se asemejan a tubos capilares en formas rectos, de paredes suaves y diámetro constante, es más práctico e instructivo contar con manojos de tubos capilares en forma de ondas de diámetro pequeño determinado.

Para obtener la viscosidad se utiliza un tubo capilar de  $L$  cm de longitud y  $r_o$  de radio interior a través del cual avanza un fluido de  $\mu$  poises de viscosidad en un flujo laminar o viscoso bajo una presión diferencial de  $(p_1 - p_2)$  dinas por  $\text{cm}^2$  y se mide el tiempo  $t$  que tarda en atravesar por completo el capilar. Si el flujo humedece las

paredes del capilar, la velocidad allí será cero y aumenta a su máximo hacia el centro. El flujo se puede visualizar como una serie de superficies parabólicas concéntricas moviéndose a diferentes velocidades y, por consiguiente, ejerciendo fuerzas viscosas entre sí.

En la figura 69 se muestra el viscosímetro capilar instalado dentro del horno del sistema Chandler PVT 3000; además, se observan los nombres de las partes que permiten la conexión del mismo.

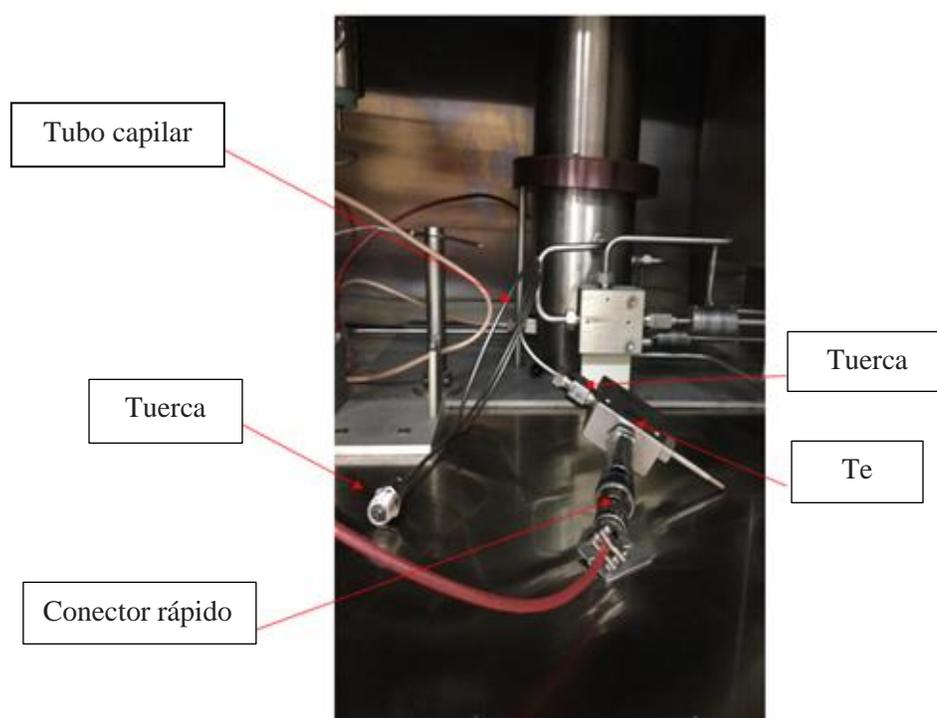


Figura 69. Viscosímetro capilar.

En la figura 70 se pueden observar las partes del viscosímetro capilar; en las cuales las férulas y el acople forman parte de la conexión autoclave, que permiten conectar el capilar dentro del horno. Por otra parte, el manajo de capilares varía según la longitud del capilar.

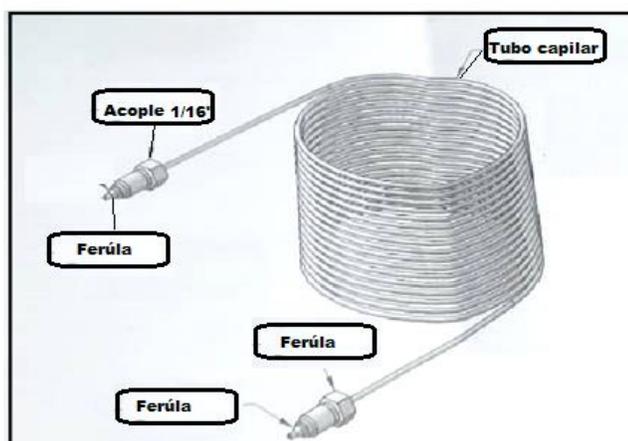


Figura 70. Partes del viscosímetro capilar.

### 4.3. Equipos auxiliares

#### 4.3.1. Cryette WR 5009

El Cryette es un sistema completo para almacenar una muestra, enfriar la muestra hasta una temperatura definida a una tasa controlada, congelar el entorno, medir la temperatura de la muestra durante el proceso completo, y finalmente indicar el punto de congelamiento de la muestra, todo automáticamente. El diseño único del Cryette hace cada uno de estos pasos muy reproducibles a través de la automatización, minimizando de esta manera la técnica del operador, fatiga, y muchas fuentes de error. El equipo dispone de controles para cambiar la temperatura del baño y el rango del termómetro, así como para extender el uso de las mediciones a una variedad de soluciones (Systems, 2004).

Los nombres de las varias partes del instrumento se indican en la figura 71. Se sugiere que el usuario se familiarice con cada componente del instrumento para obtener los mejores resultados.

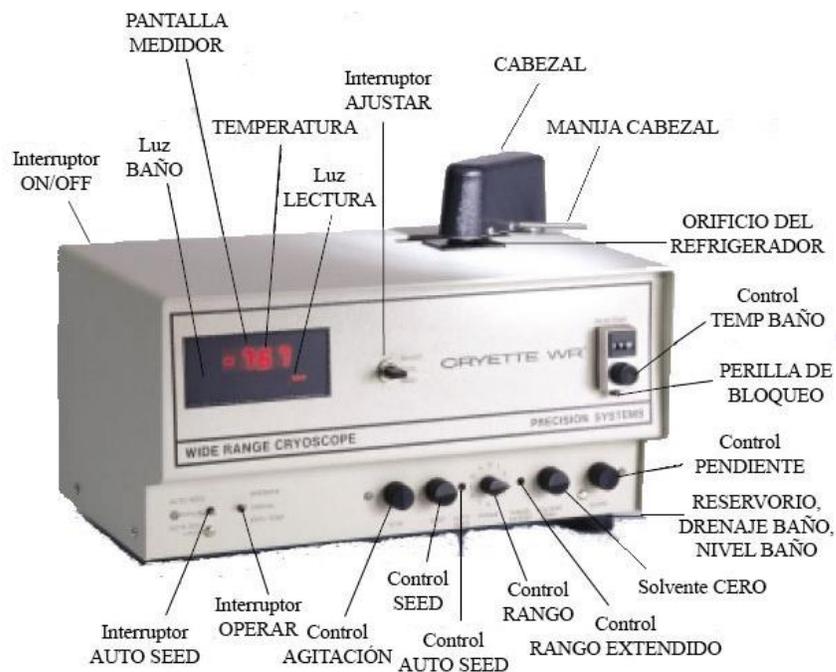


Figura 71. Equipo Cryette WR para mediciones de peso molecular del crudo.

Fuente: (Systems, 2004).

#### 4.3.2. Bomba de vacío

La bomba de vacío, marca *General Electric* modelo 5XB HOOZO, es un dispositivo que se encarga de extraer moléculas de gas de un volumen sellado, formando un vacío parcial, también permite extraer sustancias no deseadas en el sistema Chandler PVT 3000.

Para conseguir hacer el vacío en el sistema, es decir extraer todo el aire, el equipo integra una bomba rotatoria. La bomba rotatoria consta de un cilindro excéntrico y dos paletas, al girar las paletas la diferencia de presión permite que el aire en el interior del sistema se introduzca en el cilindro y desde allí por el empuje de las paletas salga al exterior. En la figura 72 se muestra la bomba de vacío empleada en el laboratorio PVT.



Figura 72. Bomba de vacío modelo 5XB HOOZO.

Algunas de las aplicaciones y usos más importantes son:

- Realizar vacío a la celda PVT.
- Realizar vacío a las válvulas y tuberías del sistema PVT.
- Realizar vacío al vial o separador atmosférico.
- Realizar vacío al gasómetro y sus conexiones.
- Realizar vacío al cilindro contenedor de gas.

#### 4.3.3. Compresor neumático

El compresor, marca Fiac modelo AB 100/268, es un tipo de maquina cuya función principal es la de hacer aumentar la presión del aire. El compresor utiliza una unidad de bombeo capaz de proporcionar hasta 250 litros de aire por minuto. La unidad de bombeo consta de un cilindro de hierro fundido de doble pistón, con cabezal de aluminio y lubricación con aceite. El equipo incluye un regulador de presión y dos manómetros, uno para la medición de la presión en el depósito y uno para la regulación de la presión del aire saliente. En la figura 73 se muestra el compresor de aire empleado en el laboratorio PVT.



Figura 73. Compresor de aire modelo Fiac AB 100/268.

Algunas de las aplicaciones y usos más importantes son:

- Proveer aire comprimido a las bombas Quizix para su adecuada operación.
- La pistola de aire a presión es empleada para destapar tuberías, válvulas y mangueras de teflón del sistema.

## 5. Programa PVTsim

### 5.1. Introducción

El PVTsim es un programa de simulación versátil creado en Noruega, desarrollado para los ingenieros de yacimientos, especialistas de flujos y procesos de ingeniería. Un análisis composicional estándar de un fluido es todo lo que se necesita para simular el comportamiento PVT teórico de petróleos y mezclas de gases condensados. Una gran cantidad de información de fluidos de yacimientos puede ser caracterizada y agrupada a un único juego de pseudo-componentes, de una manera rápida y eficiente.

El PVTsim a través de los módulos de: hidratos, parafinas (ceras), asfáltenos y escamas, permite evaluar el riesgo de la precipitación de sólidos durante el transporte del fluido en las tuberías y líneas de flujo. Este programa también permite cuantificar la simulación de la distribución de los componentes y el comportamiento de fases de

gas, petróleo y agua en un rango de condiciones desde el yacimiento hasta la superficie.

Actualmente, la UCV sólo cuenta con la licencia para los módulos PVT y MMP (presión mínima de miscibilidad) de PVTsim. En este trabajo se usará el módulo de PVT; motivo por el cual se hará referencia sólo a este.

El módulo PVT permite simular los siguientes experimentos:

- Expansión a composición constante.
- Agotamiento diferencial.
- Agotamiento a volumen constante.
- Prueba de hinchamiento.
- Prueba de separadores.
- Medidas de viscosidad en función de la presión.

Sobre el desarrollo de los simuladores numéricos de yacimientos como el PVTsim, es importante destacar que los mismos están basados en ecuaciones de estado. De acuerdo con lo expuesto por Rojas (2003), las ecuaciones de estado son expresiones matemáticas que relacionan la presión con temperatura y volumen de un componente puro o de una mezcla.

Las ecuaciones de estado constituyen un método sencillo, confiable y preciso que permite la predicción de las propiedades de los fluidos y del comportamiento de fases.

La versión utilizada de PVTsim (versión 20), se basa en las siguientes ecuaciones de estado y combinaciones de estas para predecir el comportamiento termodinámico teórico de los fluidos:

- Soave-Redlich-Kwong (SRK).
- Peng-Robinson (PR).
- Peng-Robinson modificada (PR78).

Las combinaciones, para cada ecuación, son las modificaciones realizadas por Peneloux y la modificación del parámetro de temperatura. A continuación se presenta

una descripción de las distintas ecuaciones de estado utilizadas por el programa PVTsim.

## 5.2. Ecuaciones de estado usadas por PVTsim

### 5.2.1. Soave-Redlich-Kwong (SRK).

La ecuación SRK toma la forma:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde P es la presión, T la temperatura, V el volumen molar, R la constante de los gases y “a” y “b” son parámetros de ecuación de estado, los cuales para un componente puro son determinados imponiendo las condiciones críticas:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T_c} = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial^2 V}\right)_{T_c} = 0 \quad \text{Ec. 50}$$

La siguiente relación es luego obtenida para el parámetro “a” del componente i en el punto crítico:

$$a_{ci} = \Omega_a \frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}} \quad \text{Ec. 51}$$

Y para el parámetro “b” del componente i:

$$b_i = \Omega_b \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \quad \text{Ec. 52}$$

Dónde:

$$\Omega_a = 0,42748$$

$$\Omega_b = 0,08664$$

$T_{ci}$  es la temperatura crítica del componente  $i$  y  $P_{ci}$  la presión crítica. Los valores para  $T_c$ ,  $P_c$  y  $\omega$  pueden ser tomados a partir de la base de datos del componente puro de PVTsim.

La dependencia de temperatura del parámetro “ $a$ ” es expresada en la forma de un término  $\alpha_i(T)$ , el cual multiplicado por  $a_{ci}$  proporciona la expresión final para el parámetro “ $a$ ” de la ecuación SRK.

$$a_i(T) = a_{ci}\alpha_i(T) \quad \text{Ec. 53}$$

El parámetro  $\alpha$  es por defecto obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha_i(T) = \left(1 + m \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{0.5}\right)\right)^2 \quad \text{Ec. 54}$$

Dónde:

$$m_i = 0,480 + 1,574\omega_i - 0,176\omega_i^2$$

El parámetro  $\alpha_i(T)$  es igual a 1 a la temperatura crítica a la cual la temperatura  $a_i(T)$  se hace igual a  $a_{ci}$ . Por otra parte,  $\omega$  es el factor acéntrico, y representa la acentricidad de una molécula. Es usado como parámetro para medir la complejidad de una molécula con respecto a la geometría y polaridad. Se define de la siguiente manera:

$$\omega_i = -\log_{10} P_{ri}^{vap} \Big|_{Tr=0,7} - 1$$

Donde  $P_{ri}^{vap}$  representa la presión de vapor reducida del componente  $i$  (presión de vapor dividida por la presión crítica).

### 5.2.2. SRK-Peneloux.

Con la corrección de volumen de Peneloux la ecuación SRK toma la forma:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{(V+c)(V+b+2c)} \quad \text{Ec. 55}$$

El volumen molar SRK,  $\tilde{V}$ , y el volumen molar de Peneloux,  $V$ , están relacionados como sigue:

$$V = \tilde{V} - c \quad \text{Ec. 56}$$

El parámetro  $b$  en la ecuación de Peneloux  $\tilde{b}$  está similarmente relacionado al parámetro  $b$  de SRK como sigue:

$$b = \tilde{b} - c \quad \text{Ec. 57}$$

El parámetro  $c$  puede ser considerado como un parámetro de traslación de volumen y está dado por la siguiente expresión:

$$c = c' + c'' (T - 288,15) \quad \text{Ec. 58}$$

Donde  $T$  es la temperatura en Kelvin. El parámetro  $c'$  es la corrección de volumen independiente de la temperatura y  $c''$  la corrección de volumen dependiente de la temperatura. Por defecto la corrección de volumen dependiente de la temperatura  $c''$  es ajustada a cero al menos para pseudo-componentes  $C_+$ . En general la corrección de volumen independiente de la temperatura de Peneloux para orgánicos definidos y “otros orgánicos” es obtenida de la siguiente expresión:

$$c' = 0,40768 \frac{RTc}{Pc} (0,29441 - Z_{RA}) \quad \text{Ec. 59}$$

Donde  $Z_{RA}$  es el factor de compresibilidad Racket.

$$Z_{RA} = 0,29056 - 0,08775\omega$$

$\omega$  = Factor acéntrico, se calcula de la misma forma que en las ecuaciones anteriores.

### 5.2.3. PR/PR78.

Las ecuaciones PR/PR78 toman ambas la forma:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \quad \text{Ec. 60}$$

Dónde:

$$a(T) = a_c \alpha(T) \quad \alpha(T) = \left( 1 + m \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^{0.5} \right) \right)^2$$

$$a_c = \Omega_a \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad b = \Omega_b \frac{RT_c}{P_c}$$

y

$$\Omega_a = 0,45724$$

$$\Omega_b = 0,07780$$

El parámetro m para la ecuación PR es obtenida de:

$$m = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,269922\omega^2 \quad \text{Ec. 61}$$

Con la ecuación PR78 m es obtenido de la misma correlación si  $\omega \leq 0.49$ . De otro modo la siguiente correlación es usada:

$$m = 0,379642 + \omega(1,48503 - 0,164423\omega + 0,01666\omega^2) \quad \text{Ec. 62}$$

#### 5.2.4. PR/PR78-Peneloux.

Con la corrección de volumen de Peneloux las ecuaciones PR y PR78 se convierten en:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{(V+c)(V+2c+b)+(b+c)(V-b)} \quad \text{Ec. 63}$$

Donde c es una constante dependiente de la temperatura. En general la corrección de volumen independiente de la temperatura de Peneloux para orgánicos definidos y “otros orgánicos” es obtenida de la siguiente expresión:

$$c' = 0,50033 \frac{RT_c}{P_c} (0,25969 - Z_{RA}) \quad \text{Ec. 64}$$

Donde  $Z_{RA}$  está definido como para la modificación de Peneloux de la ecuación SRK. Para otros componentes  $c'$  es obtenido como fue explicado en la sección SRK, lo cual también explica como determinar el termino dependiente de la temperatura  $c''$ . Para determinar los parámetros " $a$ " y " $b$ " se utilizan los mismos artificios matemáticos aplicados en las ecuaciones anteriores.

### 5.3. Reglas clásicas para mezclas

Las reglas clásicas aplicadas a mezclas para los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$  son:

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Z_i Z_j a_{ij} \quad \text{Ec. 65}$$

$$b = \sum_{i=1}^N Z_i b_i \quad \text{Ec. 66}$$

$$c = \sum_{i=1}^N Z_i c_i \quad \text{Ec. 67}$$

Donde  $Z_i$  y  $Z_j$  son fracciones molares,  $i$  y  $j$  índices de componentes, y

$$a_{ij} = \sqrt{a_i a_j} (1 - K_{ij})$$

El parámetro  $K_{ij}$  es una interacción binaria, este es una constante que caracteriza la interacción química entre dos componentes. El parámetro de interacción binaria es usualmente obtenido a partir de data experimental del equilibrio vapor líquido en mezclas binarias (dos componentes).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **Tipo de Investigación**

De acuerdo con los objetivos planteados, y con el estado del conocimiento sobre el tema de investigación, mostrado por la revisión de la literatura, la investigación se enmarcó en un tipo de investigación descriptiva.

Hernández, Fernández, y Baptista, (2004) señalan que los estudios descriptivos tienen como propósito especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir, evaluar o recoger información sobre diversos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar.

En tal sentido, con el presente TEG se pretende establecer la caracterización de cada componente presente en el sistema Chandler PVT 3000 con el fin de determinar su comportamiento y cumplir con los objetivos planteados.

#### **Diseño de la Investigación**

El diseño de la investigación adoptado en este trabajo especial de grado se circunscribe dentro de un tipo de diseño experimental.

De acuerdo con el planteamiento de Hernández et al., (2004), la investigación experimental es aquella en la que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas-antecedentes), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos-consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador.

Por las razones anteriores se puede concluir que esta investigación se define como una investigación de diseño experimental puesto que, las variables independientes están representadas por la temperatura, y la presión de confinamiento.

En este orden, se plantea una metodología de trabajo fundamentada en la expansión de fluidos, la cual se expone a cambios en la presión de confinamiento que afectan directamente al volumen de la muestra y con ello a la generación de las propiedades PVT.

### **Metodología Experimental**

Para el adecuado cumplimiento de los objetivos específicos planteados, se siguió un proceso metodológico estructurado en seis grandes fases, y representado esquemáticamente de la siguiente manera:

#### **1 Revisión bibliográfica**

---

Se realizó una revisión bibliográfica con el propósito de adquirir conocimientos relacionados con los métodos experimentales frecuentemente implementados en laboratorios PVT para caracterizar fluidos de yacimientos; abarcando diversas fuentes como trabajos especiales de grado, artículos de investigación, revistas especializadas, libros, entre otros.

#### **2 Identificación de los componentes del sistema Chandler PVT 3000**

---

Revisión del manual de usuario del sistema Chandler PVT 3000 del fabricante *Chandler Engineering*, identificación de los componentes y funcionamiento del sistema.

#### **3 Ensamblaje de los componentes del sistema Chandler PVT 3000**

---

- Revisión de los componentes.
- Elaboración de conexiones.
- Instalación de los componentes.

#### **4 Verificación del funcionamiento del sistema Chandler PVT 3000**

---

El procedimiento de verificación del funcionamiento del sistema se realizó mediante la revisión del manual de usuario del sistema, instrucciones y recomendaciones del personal del laboratorio de Análisis PVT libre de Mercurio de PDVSA Intevep, y abarca las siguientes actividades:

- Encendido del sistema.
- Inicialización de los programas de control del sistema.
- Prueba de fugas.
- Mantenimiento de los componentes.
- Calibración de los componentes.

#### **5 Ejecución de estudio PVT para determinar las propiedades termodinámicas y composición del fluido**

---

El procedimiento para la ejecución del estudio PVT se realizó mediante compilación de instrucciones y recomendaciones del personal del laboratorio de Análisis PVT libre de Mercurio de PDVSA Intevep, y abarca las siguientes actividades:

- Ejecución de pruebas PVT convencionales en muestra de gas condensado, mediante el uso del sistema Chandler PVT 3000.
- Determinación de las propiedades termodinámicas, y composición del fluido mediante el uso de datos experimentales y correlaciones empíricas.
- Evaluación de la consistencia de las pruebas PVT.

#### **6 Comparación de las propiedades PVT experimentales con las estimadas mediante el uso del simulador PVTsim**

---

Se realizó la simulación composicional con objeto de predecir las propiedades termodinámicas y estimar sus desviaciones respecto a las propiedades medidas en el laboratorio.

### **1. Revisión bibliográfica**

Durante el proceso de investigación, se realizó una revisión bibliográfica con la finalidad de establecer las bases teóricas requeridas para el desarrollo del trabajo investigativo. En tal sentido, para propósitos de esta investigación se hizo un examen exhaustivo de los diferentes métodos experimentales para caracterizar los fluidos de yacimiento en diversos artículos, trabajos de grado y libros, con el fin de relacionar dichos métodos con el proceso que se lleva a cabo en el sistema Chandler PVT 3000 de *Chandler Engineering*. Igualmente, se hizo una revisión del manual de operación del sistema que proporciona la compañía fabricante al usuario.

### **2. Identificación de los componentes del sistema Chandler PVT 3000**

Como se ha señalado previamente, la revisión del manual de operaciones del sistema Chandler PVT 3000, constituye una de las fases más importantes de esta investigación, puesto que permite al usuario identificar cada uno de los componentes que integran el sistema de medición, así como comprender la funcionalidad de los mismos. Aunado a esto, esta revisión conlleva a aclarar las interrogantes planteadas sobre la configuración de los equipos para la ejecución de las pruebas en el laboratorio. De la misma manera se describen los componentes y las líneas de flujo a utilizar para la inyección de la muestra en la celda, mediante la presentación de un diagrama de flujo. En este aspecto, es necesario precisar que el diagrama fue replanteado motivado a que no se contó con los componentes necesarios para instalar la bomba quizix en serie, como se indica en el diagrama que originalmente *Chandler Engineering* establece.

### **3. Ensamblaje de los componentes del sistema Chandler PVT 3000**

En esta fase se elaboraron 5 clases de conexiones de tuberías y se realizó la interconexión de los diversos componentes que integran el sistema de medición.

### 3.1. *Línea con conexiones cono-roscadas (autoclave).*

Esta línea es empleada para hacer fluir aceite hidráulico desde la bomba Quizix hasta la válvula de seguridad MV16 del cilindro portamuestra. De igual manera, este tipo de conexiones son empleadas en todos los puertos de Sistema Chandler PVT 3000. Para realizar este tipo de conexiones se requiere: (a) corta tubos, (b) lija de metal, (c) prensa, (d) herramienta para realizar cono, (e) herramienta para hacer rosca o tarraja, (f) tuerca autoclave, (g) línea de alta presión de acero inoxidable y, (h) collar. El procedimiento de elaboración es como sigue:

- i. Colocar la sección de línea en la prensa verticalmente.
- ii. Realizar corte transversal con la herramienta corta tubos.
- iii. En caso de que la boca de la línea sea tapada por la rebarba del metal a causa del corte; se puede reabrir con la punta del eliminador de rebarba que forma parte del corta tubo (véase figura 74).

**Nota:** Es importante una vez cortada la línea con el corta tubos, eliminar la rebarba de la boca de la línea antes de proceder a realizar el cono, ya que de lo contrario el cono se realizaría con deformaciones. Para ello, desplegar el eliminador de rebarba de la herramienta corta tubos.

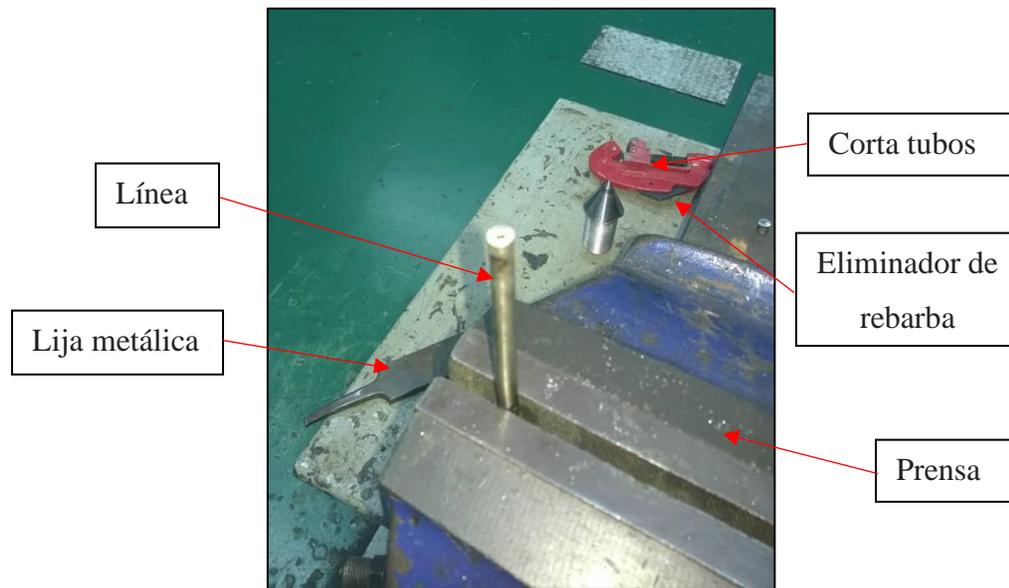


Figura 74. Línea con conexión autoclave.

- iv. Ajustar el extremo superior de la línea a la herramienta (véase figura 75) para la elaboración del cono.



Figura 75. Herramienta para realizar cono.

- v. Girar la manilla en sentido horario, como se muestra en la figura 76.



Figura 76. Manipulación de la herramienta para hacer cono.

- vi. Ajustar la rosca de la herramienta no muy fuerte después de cierto tiempo de girar la manilla, como se muestra en la figura 77.



Figura 77. Ajuste de la rosca de la herramienta.

- vii. Continuar girando la manilla y continuamente verificar que la línea no se desplace hacia abajo; observando por el agujero ubicado por debajo de la rosca para el ajuste de la herramienta.

- viii. Verificar por el agujero que estén saliendo las partículas de metal (esto es indicio de que se está realizando el cono correctamente).
- ix. Cuando se observe que el cono ya esté formado (un indicio de esto es cuando se observa el cono en la parte superior del agujero); se procede a retirar la herramienta desajustando la rosca de la misma.
- x. Para retirar la herramienta se debe girar la manilla en sentido contrario, aflojar la rosca de ajuste, y finalmente retirarla.
- xi. Manteniendo la línea fija en la prensa, con el cono ya formado; se procede a colocar la herramienta para hacer roscas o tarraja; para esto se introduce el extremo superior de la línea por la parte de la herramienta que tiene los dientes metálicos.

**Nota:** Para realizar la rosca es necesario que los dientes de la herramienta queden hacia arriba para que la parte lisa o parte de abajo sirva de guía para realizar la guía.

- xii. Hacer presión hacia abajo de manera que la herramienta encaje por debajo del cono hecho con la configuración anterior. Comenzar a girar en sentido contrario (horario) hasta notar que los giros (en sentido anti horario) ameritan un mayor esfuerzo, esto es un indicio de que las roscas se están realizando correctamente. (véase figura 78).



Figura 78. Tarraja (herramienta para fabricar roscas).

- xiii. Proceder a retirar la herramienta, girándola en ambos sentidos para rehacer las roscas no terminadas.
- xiv. La herramienta debe aflojar y apretar de manera enroscada; así se asegura que la rosca esté bien hecha (véase figura 79).

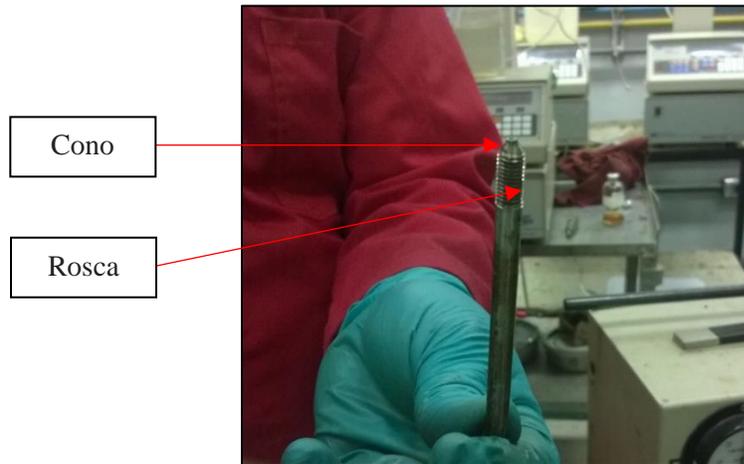


Figura 79. Cono y rosca elaborados.

- xv. Finalmente, colocar la tuerca autoclave y enroscar el collar correspondiente, como se muestra en la figura 80.

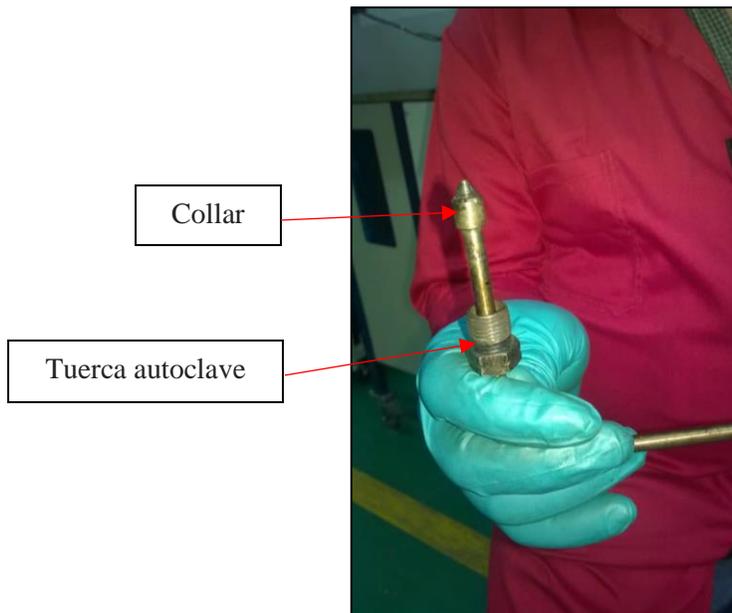


Figura 80. Conexión autoclave terminada.

### 3.2. Líneas con conexiones HIP

Las conexiones HIP son utilizadas para conectar líneas de tubería al cilindro portamuestras. Por este tipo de líneas fluye la muestra del yacimiento, y su procedimiento de elaboración es como sigue:

- i. Colocar una tuerca 1/8" autoclave en una línea 1/8" de alta presión, seguidamente colocar un collar HIP 1/8" como el que se muestra en la figura 81, de tal manera que su sección más gruesa apunte hacia la tuerca.
- ii. Retirar la tuerca 1/8" autoclave y su respectivo tapón de seguridad de la válvula correspondiente del cilindro portamuestra.
- iii. Cuidadosamente, introducir la línea en el puerto de la válvula, asegurándose que ajuste correctamente. Luego, enroscar la tuerca autoclave hasta que quede fija. Esto comprimirá el collar hasta que adopte su forma y posición definitiva en la línea, como se observa en la figura 81.

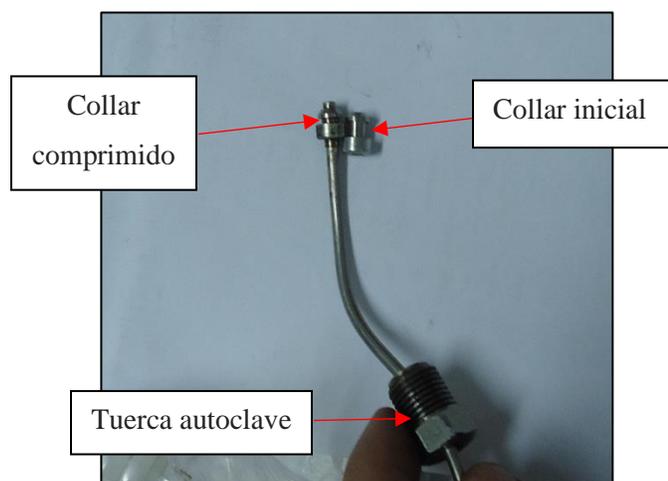


Figura 81. Línea con conexión HIP.

### 3.3. Conexiones *straight hembra*.

Este tipo de conexión es utilizada para conectar líneas de alta presión desde la válvula de muestra del cilindro portamuestra hasta el adaptador *straight* macho ubicado en la válvula de seguridad. Otra aplicación de este tipo de conexión es unir el tramo de línea que va desde la válvula de entrega de la bomba Quizix (1A) hasta la

válvula de fluido hidráulico del cilindro portamuestra. Con este fin, la conexión se emplea en el extremo *straight* macho del niple reductor de diámetro, como se muestra en la figura 82.

Los equipos y materiales requeridos para realizar este tipo de conexiones son los siguientes: (a) línea de alta presión de acero inoxidable, (b) herramienta ruska para la conificación de la boca de la línea, (c) cincel, (d) prensa, (e) martillo, (f) lima metálica, y (g) tuerca *straight* hembra.

El procedimiento de elaboración es como sigue:

- i. Cortar la sección de línea a la cual se desee realizar la conexión ruska.
- ii. Fijar el extremo superior de la sección de la línea en la prensa, de manera que sobresalgan unos 5 cm por encima de la misma.
- iii. Pasar una lima metalizada para eliminar asperezas metálicas de los bordes de la boca de la línea, producto del corte realizado.
- iv. Introducir la tuerca *straight* hembra y ubicarla a 8 cm aproximadamente del extremo superior.
- xvi. Retirar la sección de línea de la prensa y colocar la herramienta ruska (véase figura 83).
- v. Luego, introducir la sección de la línea en el canal central de la herramienta de manera que sobresalgan 2-3 cm por encima; posteriormente apretar la prensa para para ajustar y fijar bien la línea con el canal de la herramienta.

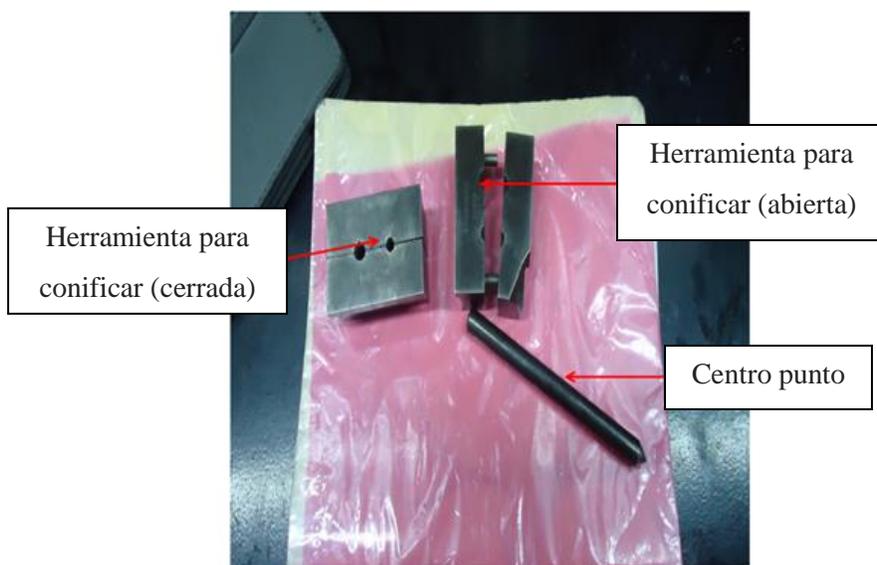


Figura 82. Herramienta para conificar líneas.

- vi. Centrar la punta del cincel metálico sobre la boca de la línea.
- vii. Martillar sobre el cincel (golpes suaves) de manera que se vaya conificando la boca de la línea.
- viii. Pasar la lija metálica por la boca de la línea para eliminar asperezas.
- ix. Retirar la línea de la prensa y de la herramienta para conificación. Subir el acople hasta la boca conificada de la línea; se debe verificar que el acople no sobresalga del extremo conificado, comprobando de esta manera que la conexión se realizó correctamente y evitar fugas (véase figura 83).

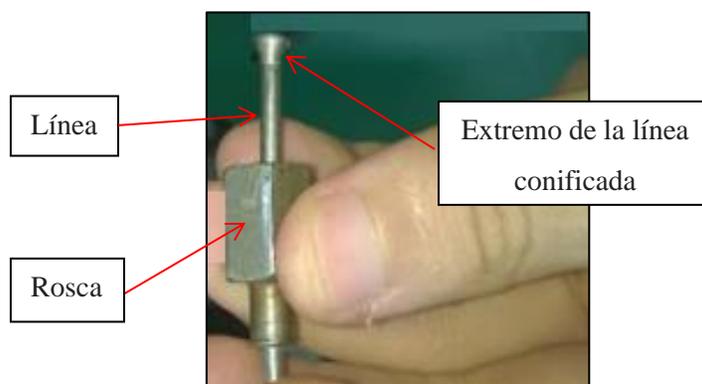


Figura 83. Línea con conexión *straight* hembra.

Este tipo de conexión puede ir acoplada con la conexión *straight* macho; la cual se caracteriza por tener forma similar a un tornillo de roscas y existe en forma de L, de cruz o tornillo recto reductor de diámetro. Ambas conexiones (macho y hembra) pueden trabajar a altas presiones. En la figura 84 se observa un adaptador con conexión *straight* macho.



Figura 84. Adaptador con conexión tipo *straight*.

#### 3.4. **Línea con conexiones swagelok (baja presión).**

Este tipo de conexión es empleada básicamente para conexiones a bajas presiones, como por ejemplo las conexiones llevadas a cabo en la conexión tipo cruz del gasómetro; algunas conexiones empleadas en el separador *flash* de dos etapas y partes de las conexiones de baja presión (conexiones de drenaje y reservorio de aceite hidráulico) de la bombas Quizix. Por este tipo de conexiones se hacen fluir gas o aceite hidráulico dependiendo de sus respectivas aplicaciones.

Entre los equipos y materiales requeridos para realizar este tipo de líneas se tienen: (a) Férula swagelok, (b) cono (c) reductor de diámetro 1/4" a 1/8" o 1/8" a 1/16" dependiendo de la conexión que se desee llevar a cabo, (c) anillo, y (d) línea de baja presión de acero inoxidable/cobre.

El procedimiento operacional para realizar la rosca de este tipo de línea es el siguiente:

- i. Tomar la línea e introducirle la rosca (hembra) swagelok, bajar esta rosca 7 centímetros de separación con la boca de la línea.
- ii. Posteriormente introducir la férula swagelok.

iii. Desplazar unos milímetros de separación la férula del estremo de la línea.

En la figura 85 se muestra los elementos básicos de una conexión swagelok, donde se observa: la rosca, la férula, el reductor de diámetro y el cono. Es importante señalar que estos elementos deben de estar correctamente dispuestos y acoplados; ya que cada uno de los mismos cumple una función pertinente para lograr un sello adecuado y evitar fugas de fluidos durante la elaboración de una prueba determinada.

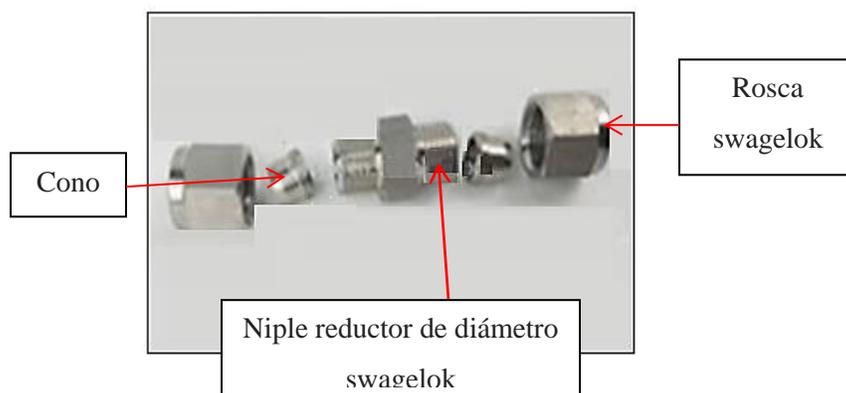


Figura 85. Elementos básicos swagelok.

Fuente: (Swagelok, 2013).

iv. Colocar el cono swagelok en el extremo de la línea (véase figura 86).

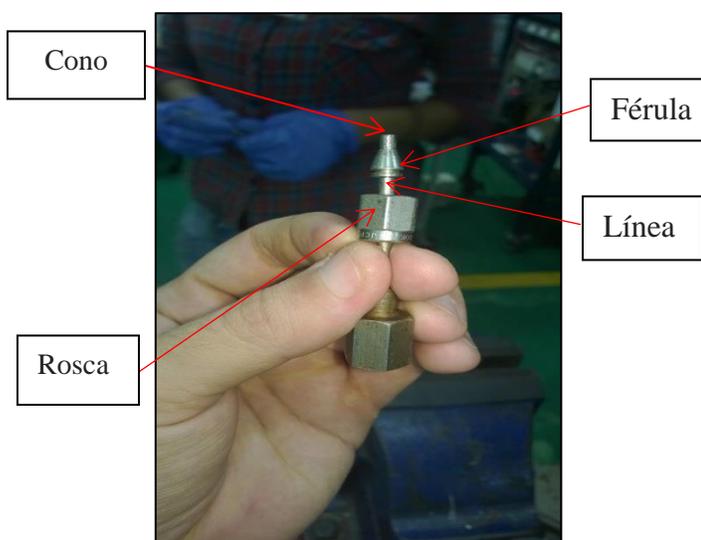


Figura 86. Línea con conexión swagelok terminada.

- v. Ajustar suavemente con el acople (macho) reductor de diámetro, como se muestra en la figura 87.



Figura 87. Reductores de diámetro.

- vi. A medida que se aplica presión cuando se está ajustando, el cono y la férula se fijan de manera estable al extremo de la línea (lo cual permite un perfecto sello metal-metal, evitando fugas del fluido).

### 3.5. *Conexión tipo aguja.*

Este tipo de conexión se utiliza en las pruebas liberación instantánea y agotamiento a volumen constante para permitir extraer una alícuota del fluido de muestra desde el puerto *GAS IN/OUT* de la celda auxiliar al separador atmosférico (vial), y para posteriormente transportar el gas liberado en el vial hasta las cámaras del gasómetro.

Este tipo de línea se caracteriza por usar conexiones swagelok. Entre los equipos y materiales requeridos para elaborar la línea se tienen: (a) Rosca swagelok, (c) férula, (d) cono, (d) reductor de diámetro 1/4" a 1/8" o 1/8" a 1/16" dependiendo de la conexión que se desee llevar a cabo, (e) corta tubo, (f) sección de línea de alta presión (8cm), (g) prensa, (h) lima metálica.

El procedimiento operacional para realizar la rosca de este tipo de línea es el siguiente:

- i. Ajustar la sección de línea con una prensa de manera que sobresalga de 5 a 8 cm por encima de la misma.
- ii. Realizar con la herramienta corta tubo un corte transversal en el extremo superior de la línea.

- iii. Fijar la línea en la prensa con un ángulo de 45° aproximadamente; pasar una lima metálica en el corte transversal de la línea de manera que aparezca el borde del agujero.
- iv. Lijar el extremo de la línea hasta que aparezca la punta afilada similar al filo de una aguja.
- v. Realizar el dobléz de la línea haciendo presión con la ayuda del dedo pulgar de manera que quede de forma arqueada.
- vi. Elaborar la conexión en el extremo inferior siguiendo el procedimiento explicado anteriormente en la sección 3.4 de línea con conexiones swagelok.
- vii. Unir la conexión tipo aguja al extremo de una línea (flexible metálica) o a una manguera de teflón (véase figura 88).



Figura 88. Conexión tipo aguja.

### 3.6. **Conexión de las tuberías de la bomba Quizix.**

Las líneas que salen de la bomba conforman un sistema que permite conectar el horno y el cilindro de almacenamiento de muestras a las bombas para el flujo de fluidos. Todas las tuberías utilizadas son de acero inoxidable, con un diámetro externo (OD) de 1/4" y 1/8" y se emplean conexiones cono-roscada (autoclave), ruska hembra, y HIP. Los materiales requeridos para la instalación son los siguientes: (a) un codo autoclave 1/4" hembra, (b) una tuerca y collar 1/4" autoclave, (c) niple reductor de diámetro, (d) una tuerca 1/8 autoclave y férula 1/8 HIP, (e) niple con agujeros de purgue, (f) tuerca ruska *straight* hembra, y (g) secciones de tubería.

El montaje que se sigue para la correcta instalación es el siguiente:

- i. Del codo autoclave, instalar una sección de tubería que conecte a la válvula de entrega del cilindro 1A de la bomba Quizix. Seguidamente, del codo autoclave conectar una sección de tubería que conecte al extremo adecuado del niple con agujeros de purgue.
- ii. En el extremo opuesto del niple con agujeros de purgue, conectar el niple reductor de diámetro que a su vez debe conectarse a la tuerca ruska de una línea 1/8”.
- iii. Conectar el extremo con conexión HIP de la línea 1/8” a la válvula de aceite hidráulico del cilindro portamuestra.
- iv. De la válvula *HYDRAULIC OIL IN/OUT VALVE* del horno, instalar una sección de tubería 1/4” que conecte a la válvula de entrega del cilindro 1B de la bomba Quizix.
- v. Cuidadosamente verificar que todas las conexiones estén bien ajustadas. Si las conexiones no están ajustadas, pueden ocurrir fugas en el sistema.

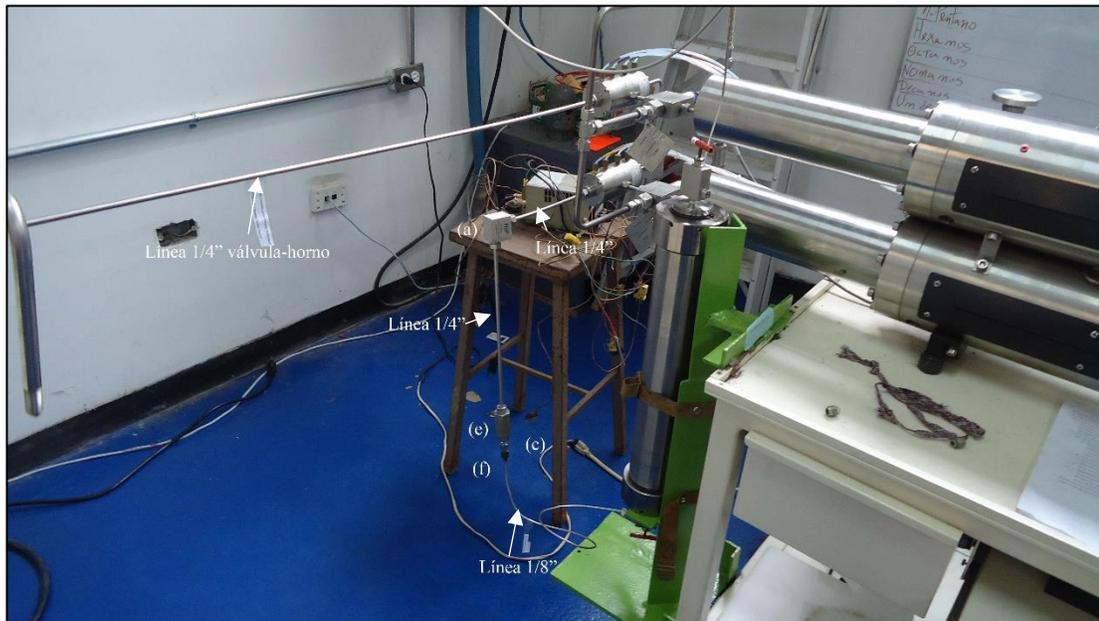


Figura 89. Instalación de las tuberías de la bomba Quizix.

### 3.7. *Conexión de las tuberías del cilindro portamuestras.*

Las líneas que entran y salen del cilindro, permiten conectar la bomba y el horno al cilindro con el propósito de presurizar y desplazar la muestra de hidrocarburos hacia o desde cualquiera de las celdas que se desee utilizar. Las tuberías utilizadas son de acero inoxidable (SS-316), ¼” OD cono-roscada (autoclave), y 1/8” OD con conexión HIP en un extremo y conexión *straight* hembra en el otro. Los materiales requeridos para la instalación son los siguientes: (a) un niple hembra 1/4” autoclave a 1/8” ruska, (b) un adaptador ruska 1/8” NPT, (c) una tuerca y collar ¼” autoclave, (d) dos tuercas hembra 1/8” ruska, (e) dos tuercas 1/8” autoclave con collares HIP, (f) teflón, y (g) secciones de tubería.

El montaje que se sigue para la correcta instalación es el siguiente:

- i. Del codo HIP ¼” conectar una sección de línea que conecte a la válvula de aceite hidráulico del cilindro (véase procedimiento técnico: Conexión de las tuberías de la bomba Quizix).
- ii. De la válvula localizada en la parte superior del cilindro (lado de la muestra), instalar una sección de tubería 1/8” OD que conecte al juego de válvulas de seguridad ruska (véase procedimiento técnico: Instalación de válvulas de seguridad ruska) instaladas en el puerto *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT*. En el extremo correspondiente al cilindro, utilizar una conexión HIP. En el extremo correspondiente al juego de válvulas, utilizar una conexión *straight* hembra.



Figura 90. Instalación de las tuberías del cilindro de muestras.

### 3.8. *Instalación de válvulas de seguridad Ruska.*

Las válvulas de seguridad Ruska de alta presión están diseñadas para proporcionar al usuario seguridad adicional en aquellas operaciones que impliquen inyección/extracción de fluidos hacia o desde el horno. Vale decir, que se utilizan dos tipos de válvulas Ruska en el sistema Chandler PVT 3000, la válvula de seguridad tipo L y el arreglo de válvulas de seguridad.

La válvula Ruska tipo L consiste en una válvula simple de 1/8" OD tipo *straight*, la cual fue modificada para fijar una conexión tipo aguja en su extremo inferior mediante puntos de soldaduras, esto con el propósito de permitir extraer a través de la misma una alícuota de la muestra de gas condensado contenida en la celda auxiliar durante el desarrollo de las pruebas *flash* inicial, y CVD. En este sentido, la válvula debe ser conectada en el puerto *GAS IN/OUT VALVE* del horno.

Por otra parte, el arreglo de válvulas de seguridad está conformado por dos válvulas simples y una válvula de tres vías, y se conectan en el puerto de inyección a la celda auxiliar *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT*. Este arreglo de válvulas

permite un mayor control en el delicado proceso de inyección de la costosa muestra de fluido de yacimiento hacia la celda.

Todas las válvulas del arreglo son 1/8" OD tipo *straight*, en este sentido, para su instalación requieren de adaptadores Ruska 1/8" machos con conexión tipo *straight*, como los mostrados en la figura 84. La válvula de tres vías se conecta en el medio del arreglo. Esta válvula siempre permite el paso en horizontal y regula el paso en vertical con el fin de conectar una manguera a la bomba de vacío y realizar succión al sistema de tuberías. Las válvulas simples se conectan en los extremos, como se muestra en la figura 91.

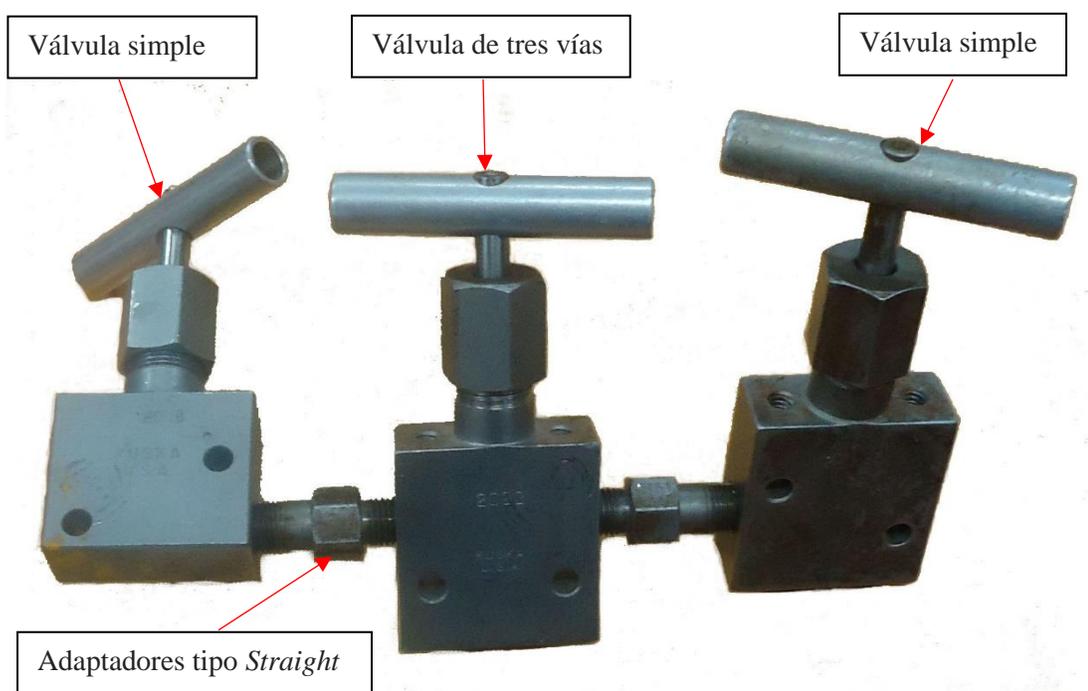


Figura 91. Arreglo de válvulas de seguridad Ruska.

Es de hacer notar que la válvula de tres vías contiene dos círculos paralelos ubicados en la parte frontal inferior. Esto le permite al operador identificarla y verificar que efectivamente la válvula permite siempre el paso en horizontal y regula el paso en vertical.

Finalmente, el arreglo de válvulas y la válvula tipo L se conectan al sistema en el puerto *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT* y *GAS IN/OUT* respectivamente, los

cuales tienen una conexión autoclave ¼" OD. Para ello, se requiere un cambio en el tipo y tamaño de la conexión, lo cual se consigue mediante un niple reductor de diámetro (véase figura 93). El niple tiene un extremo de tipo *straight* macho, el cual se conecta en las válvulas. En el otro extremo del adaptador, se coloca una tuerca autoclave ¼" OD con su respectivo collar ¼". Posteriormente, se conecta a los puertos indicados y se verifica que todas las conexiones estén debidamente ajustadas. En la figura 92 se muestra el arreglo de válvulas de seguridad instaladas en el equipo.

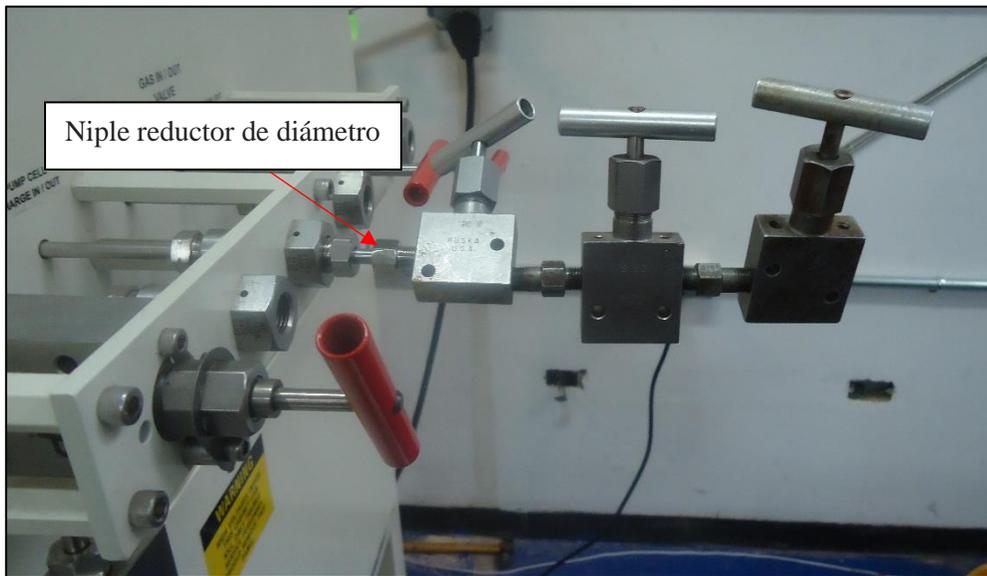


Figura 92. Instalación válvulas de seguridad.

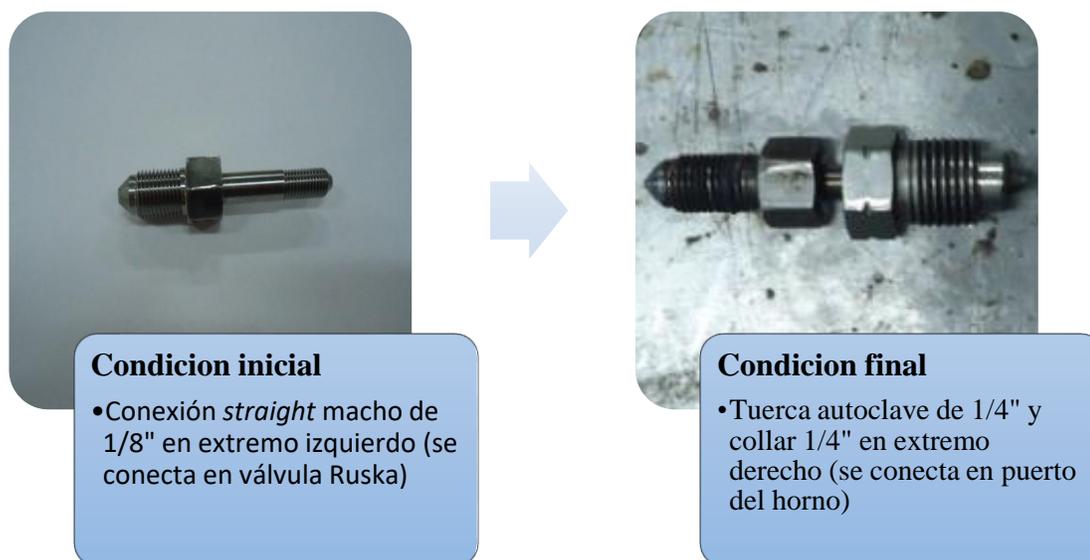


Figura 93. Proceso de elaboración del niple reductor de diámetro.

### 3.9. Conexión de las tuberías del separador flash.

Entre los equipos y materiales requeridos para realizar este tipo de conexiones se tienen: (a) Férula swagelok, (b) cono swagelok (c) reductor de diámetro 1/4" a 1/8", (d) línea de baja presión de acero inoxidable 1/8" flexible, (e) 4 abrazaderas, (f) teflón, (g) 2 secciones de mangueras 1/4", (h) vial, (i) Equipo de baño térmico, (j) celda bomba del equipo Chandler PVT 3000, (k) cilindro porta muestra, (l) sección de manguera de teflón, y (m) línea aguja.

- i. Conectar la válvula doble (por donde ingresa el fluido proveniente de la celda bomba del equipo Chandler PVT 3000 o de un cilindro portamuestra al separador *flash*) ubicada en la parte superior del separador; para conectar esta válvula se usa una conexión swagelok de baja presión (rosca, cono y férula) se instala una sección de tubería 1/4" OD autoclave que conecte a un niple (este niple permite realizar el cambio de tamaño de diámetro de 1/4" a 1/8").
- ii. Se conecta el puerto de la válvula doble con una sección de línea de baja presión 1/8" (preferiblemente flexible).

- iii. Se ubica el separador *flash* en un lugar cerca al equipo Chandler PVT 3000 (costado derecho) o en sus efectos si no se usa este equipo; se fija unas correas aseguradoras a un cilindro portamuestra en la base ubicada en la parte trasera del separador.  
**Nota:** Si se trabaja con el cilindro contenedor de muestra, se recomienda que este se cubra con una manta térmica o cintas de calentamiento.
- iv. En el otro extremo que sale de la línea que sale de la válvula de entrada de fluido al separador como se muestra en la figura 93; se usa una conexión de tuerca de ¼" de férula de tipo HIP del cilindro portamuestra; el cual va ajustado a una rosca autoclave 1/8" ubicada en el costado derecho superior del equipo PVT 3000 o se une a la conexión HIP del cilindro portamuestra (en caso que no se use el sistema Chandler PVT 3000).
- v. Conectar un gasómetro (medidor de gas) al puerto de prueba de gas separado en la primera cámara de separación.
- vi. Conectar el segundo cilindro del gasómetro a la conexión de salida de gas de la segunda cámara de separación.
- vii. Introducir una aguja en la tapa de un vial de manera que esta esté conectada a su vez con la línea superior del gasómetro (entre el separador de equilibrio instantáneo y el gasómetro) de tal modo que por la gravedad caiga el líquido en dicho vial (este vial se conecta entre ambas líneas de salidas de gas).
- viii. Conectar dos mangueras (preferiblemente de goma) y fijar con sus respectivas abrazaderas de la siguiente manera : una en el puerto superior de entrada de fluido proveniente del equipo de baño térmico y otra manguera de la misma magnitud en el puerto inferior; la cual sirve para retornar este fluido al baño térmico una vez que ha circulado por las cámaras.
- ix. Conectar el tubo de ventilación desde el puerto VENTILACIÓN DE LA VÁLVULA DE ALIVIO a una campana ventilada, o a alguna área segura fuera del laboratorio del mismo modo, conecte el tubo desde la salida del gasómetro a un área segura.

En la figura 94 se muestra algunas conexiones y puertos del separador flash de dos etapas.

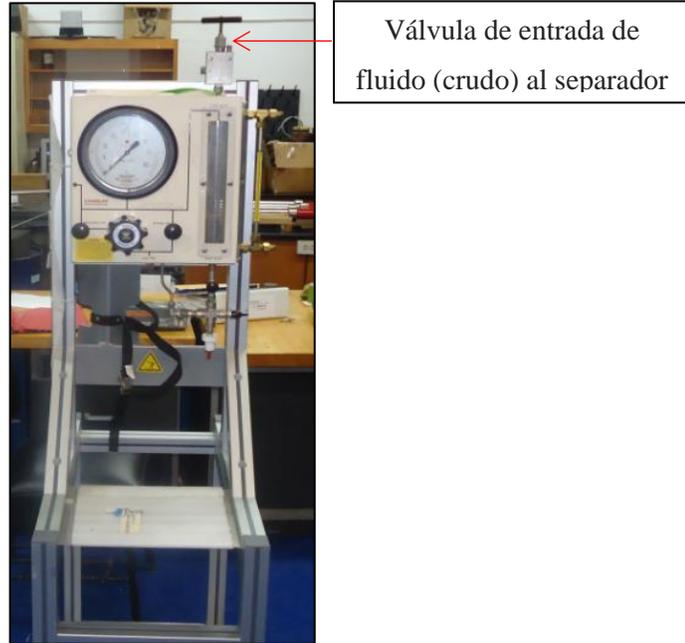


Figura 94. Válvula de entrada al separador flash de dos etapas.

En la figura 95 se muestra algunas conexiones y puertos del separador *flash* de dos etapas.

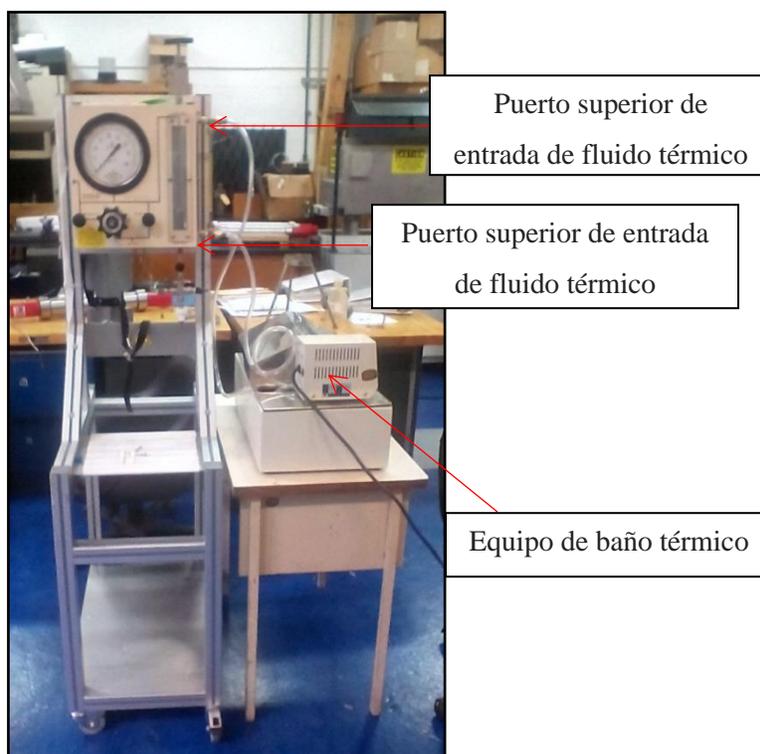


Figura 95. Separador flash conectado al equipo de baño térmico.

### 3.10. Conexión de las tuberías del gasómetro.

Las conexiones del gasómetro se caracterizan por soportar bajas presiones y pertenecer al fabricante Swagelok. Entre los equipos y materiales requeridos para realizar este tipo de conexiones se tienen: (a) Férula swagelok, (b) cono swagelok (c) reductor de diámetro 1/4" a 1/8", (c) cruz 1/8", línea de baja de acero inoxidable 1/8", (d) llave *whitey* 1/8", cilindro (75cc) *whitey*, (e) 2 líneas aguja 1/16", y (f) un vial (vidrio) con tapa hermética.

El procedimiento operacional para realizar líneas de este tipo es el siguiente:

- i. Conectar un reductor de diámetro 1/4" a 1/8" en el puerto de entrada del gasómetro.
- ii. Del reductor de diámetro conectar una sección de tubería a la conexión tipo cruz, utilizando roscas swagelok 1/8" (véase figura 96).

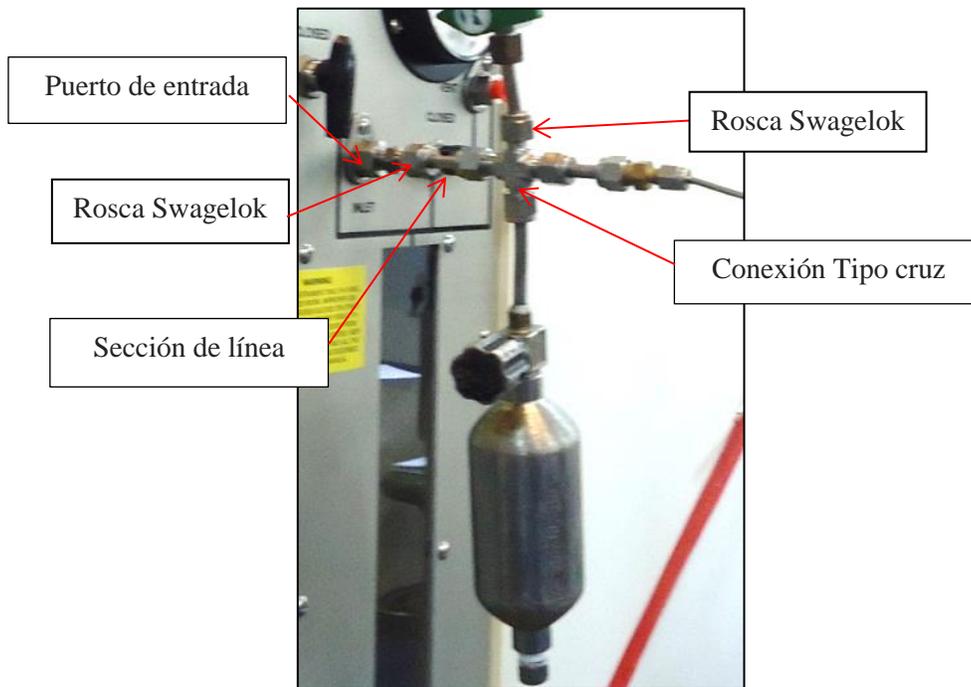


Figura 96. Instalación de la conexión tipo cruz al gasómetro.

- iii. En la parte superior de la cruz conectar una sección de línea a una llave de paso (*whitey*), empleando roscas swagelok. Conectar otra sección de línea a la parte superior de la llave de paso, de manera que un extremo de la línea quede expuesta y permita conectar una manguera de vacío en dicho extremo (véase figura 97).

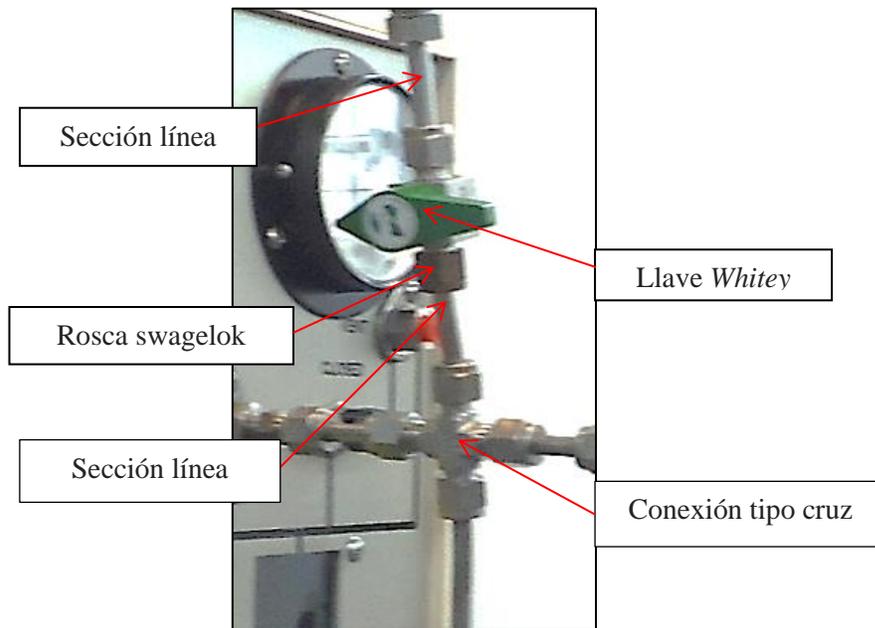


Figura 97. Instalación parte superior de la conexión tipo cruz.

- iv. En la parte inferior de la cruz conectar una sección de línea a una llave de paso (*withey*) unida a un cilindro recolector de gas (véase figura 98).

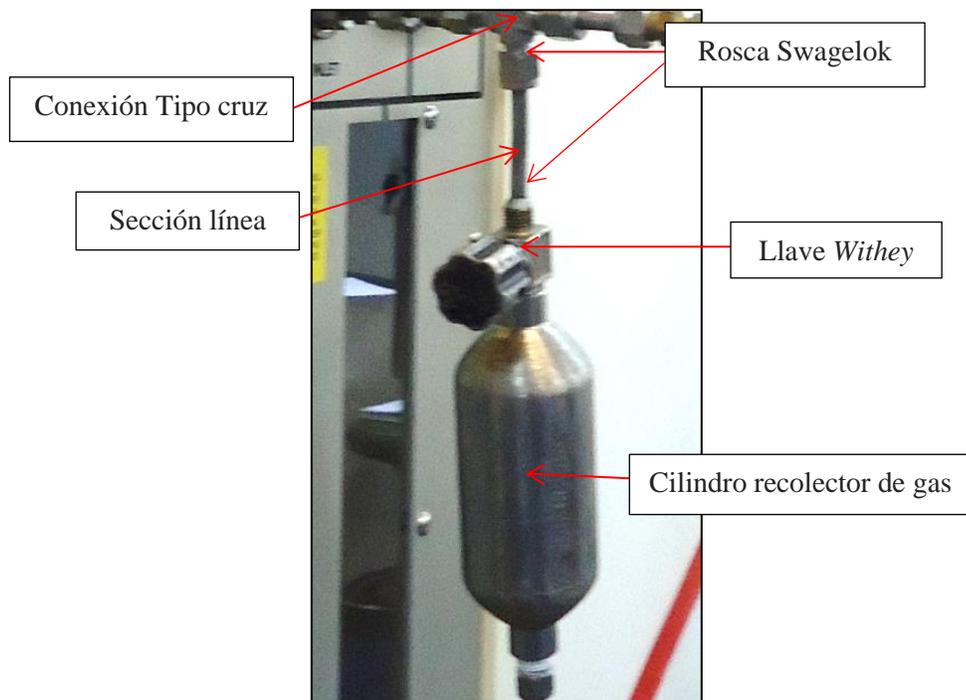


Figura 98. Instalación parte inferior de la conexión tipo cruz.

- v. La parte frontal de la cruz (véase figura 99), conecta con una rosca swagelok que se une a una sección de línea la cual está unida a un reductor de diámetro de bronce conectado a través de una rosca swagelok a una manguera de teflón con una conexión tipo aguja. Esta conexión tipo aguja se introduce en la tapa de aluminio de un vial el cual representa un separador.

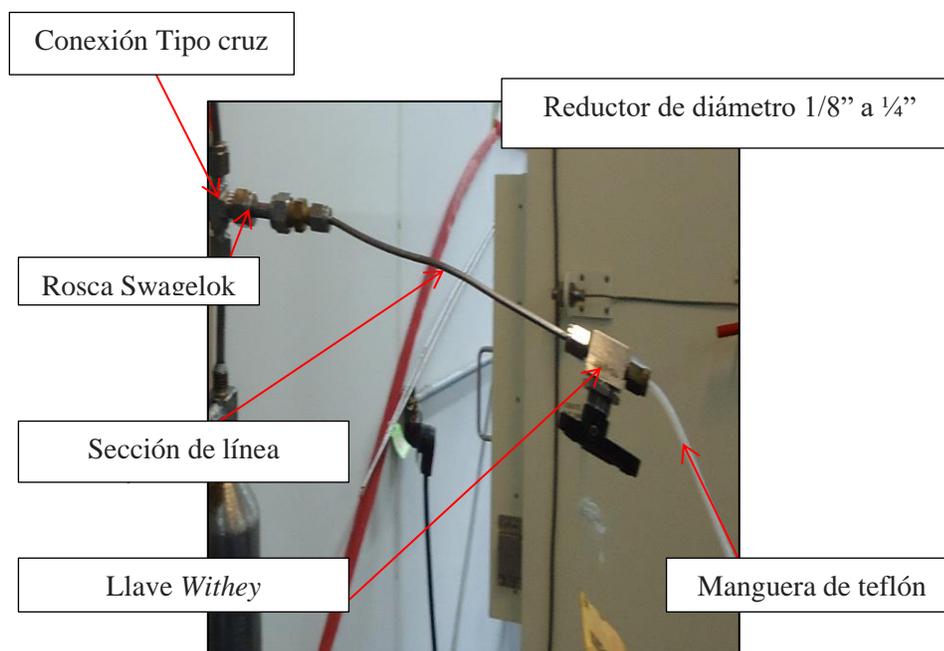


Figura 99. Instalación parte frontal de la conexión tipo cruz.

- vi. A este vial se conecta otra conexión tipo aguja, la cual va unida a su vez a una sección de línea que se conecta a una conexión de rosca autoclave que se encuentra ubicada en el costado derecho del equipo Chandler PVT 3000 (véase figura 100).

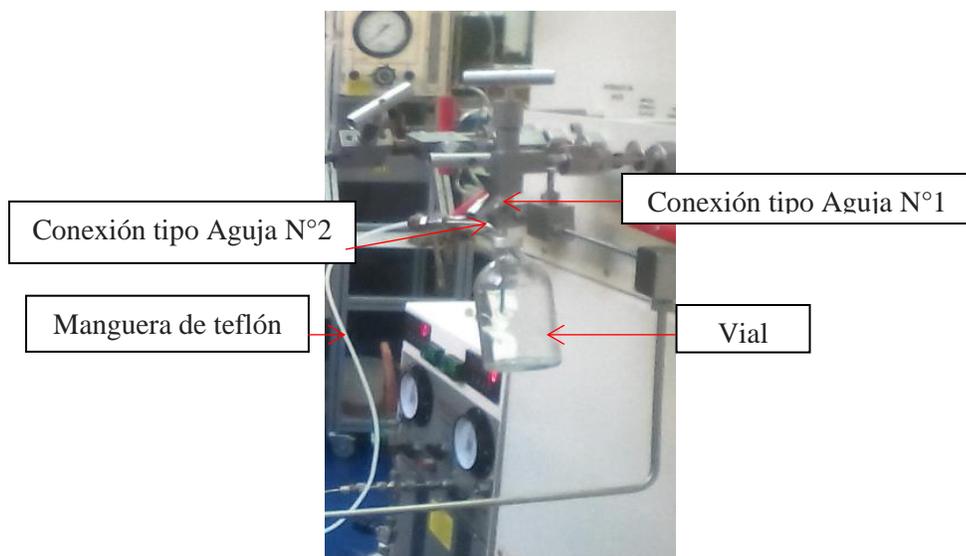


Figura 100. Vial y agujas.

En la figura 101 se presenta la configuración completa de la cruz del gasómetro.



Figura 101. Conexión tipo cruz del gasómetro.

#### **4. Verificación del funcionamiento del sistema Chandler PVT 3000.**

Para realizar la verificación del correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema automatizado Chandler PVT 3000 y comprobar que no presentan ningún tipo de falla que pudiera alterar los resultados, es necesario iniciar

el programa operativo PVT 3000, ya que tiene la versatilidad de indicar a través de ventanas emergentes cuando alguno de sus componentes no está funcionando bien.

Seguidamente, se establecen los pasos a seguir para determinar la capacidad de las celdas, calibrar los dispositivos detectores de presión, así como el mantenimiento de los diferentes componentes que integran el sistema PVT libre de mercurio – Modelo 3000, basándose en el manual del fabricante.

#### **4.1. Encendido del sistema Chandler PVT 3000.**

Previo al encendido, la siguiente lista de verificación debe ser cumplida:

- i. Todas las tuberías, líneas, y cables estén en su lugar y bien ajustadas.
- ii. Los interruptores límite de la celda bomba estén en orden (ajustarlos solo con la unidad desconectada).
- iii. El espejo de visualización de la ventana de la celda bomba esté ajustado adecuadamente.
- iv. La puerta trasera del horno no se encuentre bloqueada.
- v. Las líneas de venteo estén conectadas.
- vi. Los cables entre el panel de control y el sistema PVT 3000 estén conectados.

Para dar inicio al encendido del sistema PVT 3000, se debe activar el interruptor de energía *MAIN POWER ON/OFF* localizado en el lado inferior derecho de la unidad. Todos los componentes principales del sistema son energizados a través de este interruptor excepto la computadora del panel de control. Posteriormente, se procede a encender la computadora.

Es muy importante resaltar que el instrumento debe ser encendido antes que el programa PVT 3000 sea iniciado.

#### **4.2. Inicialización de los programas PVT 3000 y PumpWorks.**

Una vez realizadas todas las conexiones de ensamblaje se procede a iniciar el programa principal PVT 3000 haciendo doble clic en el icono del escritorio. En este

momento, el usuario se encontrará en la pantalla de control principal en estado de espera. El usuario puede monitorear el funcionamiento del sistema desde esta pantalla, puede seleccionar la celda de gas condensado para ser usada como la celda auxiliar, ajustar la temperatura del horno, controlar el movimiento del pistón de la celda bomba, así como establecer el modo de operación deseado para cada celda, como se muestra en la figura 102.

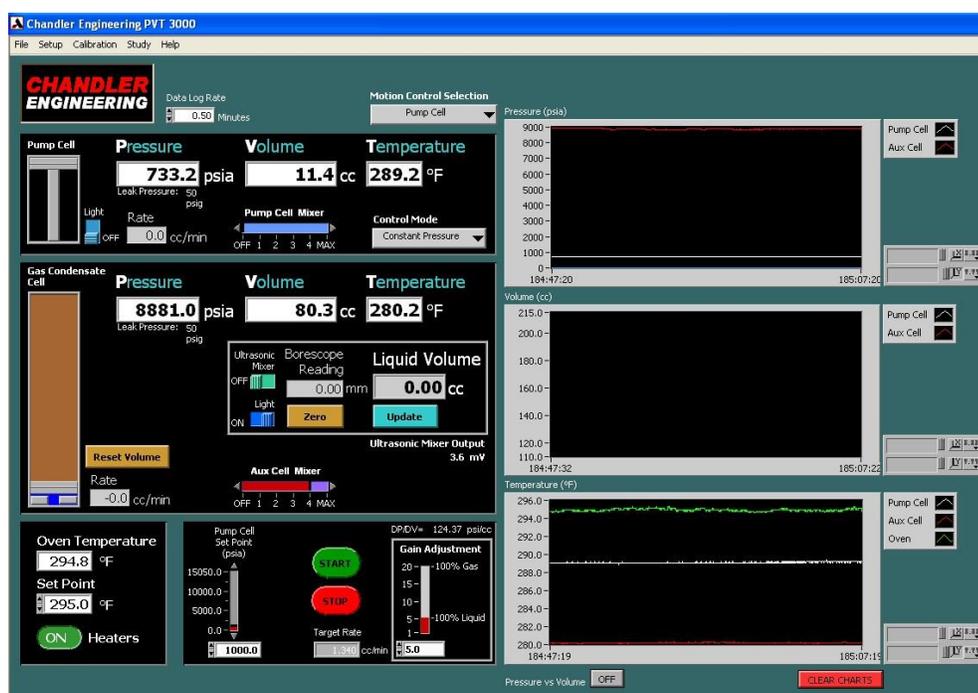


Figura 102. Pantalla principal del programa PVT 3000.

De igual forma, se procede a iniciar el programa *PumpWorks* haciendo doble clic en el icono del escritorio en la computadora portátil de las bombas Quizix. Después de iniciar el programa *PumpWorks*, las bombas indican una condición de error que requiere que las presiones de seguridad de las dos bombas sean establecidas por el usuario antes de continuar, como se observa en la figura 103 mostrada a continuación.

Seguidamente, se hace clic en el botón aceptar y se introduce una presión de seguridad en cada una de las casillas, en esta investigación se trabaja a 10000 lpc como presión de seguridad, como se observa en la figura 104.

Posteriormente, se hace clic en enviar presión de seguridad *Send Pressures to Pump(s)* a las bombas y la condición de error desaparecerá.

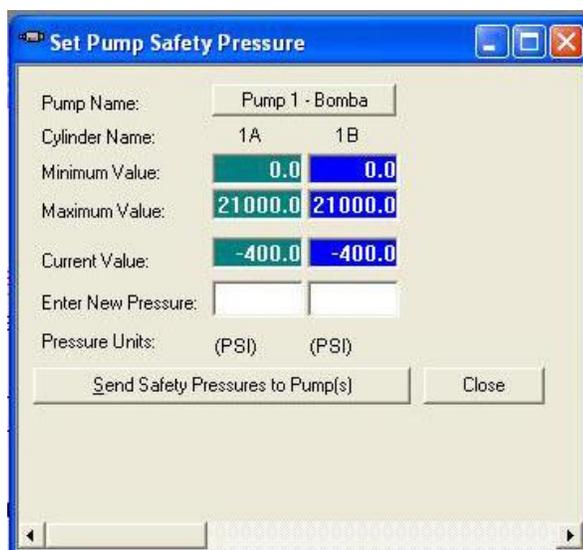


Figura 103. Condición de inicio en Quizix PumpWorks.

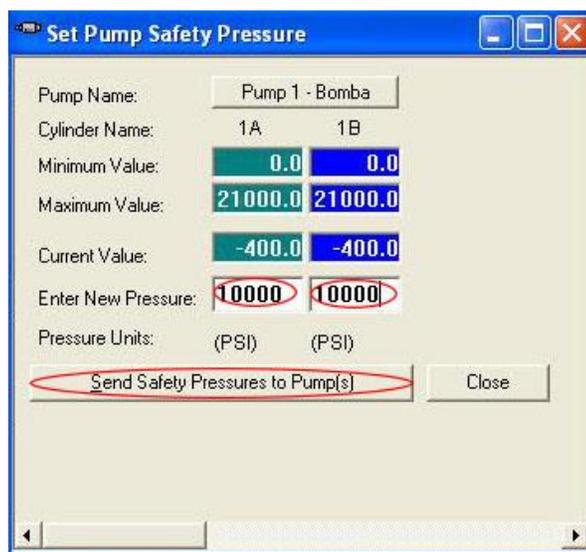


Figura 104. Condición de presión de seguridad en Quizix PumpWorks.

### 4.3. Verificación y operación de las bombas Quizix.

Debido a las altas presiones alcanzadas por las bombas Quizix, la importancia de la revisión del sistema como un procedimiento de seguridad no puede ser sobre

enfanzada. Si este procedimiento de verificación es seguido cabalmente, el sistema de bombeo está diseñado para operar de forma segura.

Por otra parte, la verificación del sistema se debe realizar en cada una de las siguientes situaciones: (a) después de cualquier cambio realizado en cualquiera de los componentes de la bomba o tuberías, (b) después de mover el sistema, reconfigurarlo o realizar cualquier otro ajuste que requiera desconectar, y luego de reconectar los cables o tuberías, y (c) si el sistema no ha sido operado por más de tres meses.

#### Chequeo de válvulas

- i. Encender la computadora y el controlador de la bomba. Conectar la manguera del compresor de aire al múltiple del solenoide piloto. Se asume que el software *PumpWorks* ya está instalado en la computadora y ejecutándose.
- ii. Usar la ventana Controles y Datos de Bomba en *PumpWorks* para abrir y cerrar las válvulas de carga y entrega de cada cilindro.
  - Verificar que la luz en el solenoide piloto etiquetado “1” esté apagada cuando la válvula de carga del cilindro 1A este cerrada. Abrir esta válvula y verificar que la luz para el solenoide piloto 1 se enciende. También, confirmar que se escuche un sonido de “reventón” a medida que la válvula abre y cierra.
  - Si la luz se enciende y apaga para un solenoide piloto diferente de aquel que se está controlando en la computadora, los cables de la válvula están cambiados y deben ser reconectados adecuadamente.
  - Si la luz no enciende o apaga, el controlador de la bomba o el solenoide piloto están funcionando incorrectamente.
  - Si no se escucha un sonido distintivo de “reventón” cuando cada válvula abre y cierra, entonces no hay una presión de aire adecuada para operar las válvulas. Revisar las líneas desde los solenoides pilotos hasta las válvulas y revise su compresor de aire.
- iii. Repetir este procedimiento para la válvula de entrega del cilindro 1A y para las válvulas de carga y entrega del cilindro 1B.

### Chequeo de los cilindros

Este chequeo de seguridad involucra activar cada cilindro manualmente a través de un recorrido completo del pistón (extensión y retractación) y observar el movimiento del pistón. Idealmente, esta prueba debe ser ejecutada sin líquido en el sistema. A menos que las bombas ya estén cargadas con líquido, usar sólo aire. Si las bombas ya contienen líquido, se puede proceder con la prueba, pero, siendo consciente que con líquidos las presiones pueden incrementar rápidamente cuando los cilindros están extendiéndose.

- i. Se asume que ya se ha completado el chequeo de las válvulas descrito en la sección previa y el software *PumpWorks* está encendido. Configurar la presión de seguridad para los cilindros que se están probando a 100 lpc (700 kPa) usando la ventana *Main->Configurar Presión de Seguridad de la Bomba*.
- ii. Configurar el modo operativo a Modo 1, el cual corresponde al modo Tasa Constante Independiente.
- iii. Configurar la Tasa de Flujo a aproximadamente 40% de la máxima tasa de flujo permitida (40 ml/min para Q6120, 80 ml/min para Q6110 y 160 ml/min para Q6105). La máxima tasa del cilindro es mostrada en el software en la ventana *Set Flow Rate* (configurar tasa de flujo). A esta tasa, (40% del máximo), un recorrido completo del pistón toma un poco más de tres minutos.
- iv. Se asume que el estatus de movimiento de cada pistón es *Max Retract*. Si es así, ajustar la dirección a Extender para cada cilindro de la bomba. Si no, ajustar la dirección primero a Retratar, hasta que alcance *Max Retract*, y luego Extender.
- v. Configurar las válvulas de tal forma que el aire o líquido desplazado no incrementarán la presión. Usualmente, esto significa abrir y cerrar las válvulas. Las válvulas de entrega pueden también ser abiertas.
- vi. Iniciar el cilindro 1A presionando el botón *Press to Start*. Observar el movimiento del pistón a través de la cubierta a un costado del cilindro 1A. Asegurar que el cilindro etiquetado “1A” corresponde al cilindro en el cual el

pistón está moviéndose. Si un cilindro diferente opera cuando se presiona el botón *Press to Start* para el cilindro 1A, entonces una conexión del cable está instalada inadecuadamente y debe ser corregida.

- vii. Cuando el pistón alcance el final de su recorrido, automáticamente se detendrá y mostrará en pantalla *Max Extend* como la posición. La dirección cambia automáticamente de *Extend* a *Retract*. Iniciar el cilindro otra vez y observar el pistón a través de la cubierta a un costado del equipo hasta que alcance su posición *Max Retract*. Además, escuchar el sonido del motor funcionando y luego deteniéndose. También se debe asegurar que el ventilador esté funcionando.
- viii. Repetir este procedimiento para cada cilindro de la bomba. Configurar la dirección a *Extend* para un recorrido de extensión del pistón, y luego a *Retract* para un recorrido de retracción. Observar y escuchar cada recorrido del pistón para una correcta operación.

#### Carga del sistema con líquido

- i. Para cargar un cilindro con fluido, dejar la presión de seguridad en 100 lpc (700 kPa) y ajustar la tasa de flujo a 50 ml/min.
- ii. Abrir la válvula de entrega, cerrar la válvula de carga, ajustar la dirección a *Extend*, e iniciar el cilindro 1A. Colocar el final de la tubería de salida de fluido hacia un contenedor de líquido y esperar por burbujas de aire a medida que el pistón se extiende y el aire es expulsado fuera del barril del cilindro.
- iii. Cuando el cilindro alcance la posición *Max Extend*, cerrar la válvula de entrega, abrir la válvula de carga, cambiar la dirección a *Retract*. Re-iniciar el cilindro, y a medida que el pistón se retracta, el fluido será transferido hacia el barril del cilindro. Luego, en el próximo recorrido de extensión, mayormente aire será aun entregado afuera de la conexión de salida de fluido. Si ni aire ni fluido es entregado afuera de la salida de fluido, probablemente exista una fuga en la tubería.

- iv. Repetir este procedimiento hasta alcanzar un recorrido del pistón donde no emerjan burbujas de aire, sólo líquido. Finalizar con un recorrido de retracción. El barril del cilindro está ahora lleno de fluido y todo el aire ha sido expelido.
- v. Repetir este procedimiento para cada cilindro de la bomba en el sistema, finalizando con todos los cilindros llenos de fluido y los pistones en la posición *Max Retract*.

#### Chequeo del transductor de presión

- i. Se asume que cada cilindro de la bomba está lleno de fluido y cada pistón está en la posición *Max Retract*. Cerrar ambas válvulas (carga y entrega) para el cilindro 1A usando el software *PumpWorks* específicamente la ventana Controles y Datos de Bomba.
- ii. Ajustar la tasa de flujo a 10 ml/min.
- iii. Con la presión de seguridad aun ajustada a 100 lpc (700 kPa), y la dirección ajustada a *Extend*, iniciar el cilindro. Observar la lectura de presión actual hasta que esta exceda 100 lpc (700 kPa) y sea detenida por el sistema digital de control de sobrepresiones. Si los cilindros están cargados con líquido, esto debe ocurrir con menos de 3 ml de fluido desplazado dentro del barril del cilindro. Si se bombea gas, tomará más alcanzar la presión de seguridad de 100 lpc.
- iv. Detener el cilindro de la bomba si:
  - La lectura de presión no para de incrementar cuando esta alcanza los 100 lpc (700 kPa).

La causa probable de esto es que el transductor de presión o el motor están conectados de forma cruzada. Por ejemplo, el transductor de presión del cilindro 1A puede estar conectado al conector del cilindro 1B.

- La lectura de presión no comienza a incrementar después de casi 30 segundos.

La causa más probable de este problema es que no haya fluido en la bomba, lo cual puede ser causado por:

- Una fuga de aire en la tubería de fluido permitiendo que el aire ingrese al sistema de bombeo.
- La tubería de alimentación está siendo obstruida, impidiendo el flujo de fluido en la tubería.
- Fluido muy viscoso, o espeso, para ser transferido hacia la bomba.

Otra posible causa es que el transductor de presión este roto y no esté reportando la presión, o el transductor de presión este mal conectado. Abrir la válvula de carga y escuchar la presión siendo liberada. Si hay presión siendo liberada, probablemente exista una falla en el transductor de presión o el transductor de presión este mal conectado. Nunca operar el sistema si existe alguna razón para creer que el transductor de presión no funciona.

- v. Repetir el chequeo del transductor de presión para cada cilindro en el sistema.

#### **4.4. Prueba de fugas.**

Esta prueba se realizó en la tubería, conexiones y válvulas que conectan la bomba Quizix 1B con la válvula *HYDRAULIC OIL IN/OUT VALVE* del horno. Es de hacer notar que la prueba de fugas en la celda auxiliar forma parte integral del procedimiento técnico: Calibración del volumen de la celda auxiliar.

Una vez hecha esta aclaración, el procedimiento es como sigue:

- i. Cerrar la válvula *HYDRAULIC OIL IN/OUT VALVE* (MV7).
- ii. Ajustar la presión de seguridad de la bomba 1B a un valor de 2000 lpc, en el programa *Pumpworks*. Una forma de hacer esto es a través del menú principal (*main menu*) localizado en la barra de menú (*bar menu*).
- iii. Ajustar la bomba 1B a presión constante a un *set point* de presión de 100 lpc. Activar la bomba y abrir la válvula de entrega, la tubería que conecta la bomba 1B con el horno (MV7) se presurizará a la presión configurada.

- iv. Verificar las fugas con el uso de agua y jabón en la tubería a través de las uniones, válvulas, y conexiones. En caso de que estas existan, se debe apretar y si es posible cambiar las conexiones, las mismas deben ser probadas nuevamente.
- v. Realizar incrementos de presión de 400 lpc en el *set point* de la bomba 1B, y repetir desde el paso iv hasta alcanzar la presión de trabajo (inyección).  
**Nota:** si la nueva presión a introducir sobrepasa la presión de seguridad, se debe incrementar esta última en 2000 lpc, de lo contrario el programa *PumpWorks* arrojará condición de error y la bomba se detendrá.
- vi. Finalmente, disminuir la presión de la bomba 1B ajustándola a un *set point* de presión de 50 lpc.

#### 4.5. Calibración del volumen de la celda auxiliar.

Los equipos utilizados para realizar este proceso son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT libre de mercurio modelo 3000.
- Bombona de aire
- Líneas y conexiones.
- Compresor.
- Bomba Quizix

En la figura 105, se presenta un diagrama del montaje experimental para llevar a cabo este proceso.

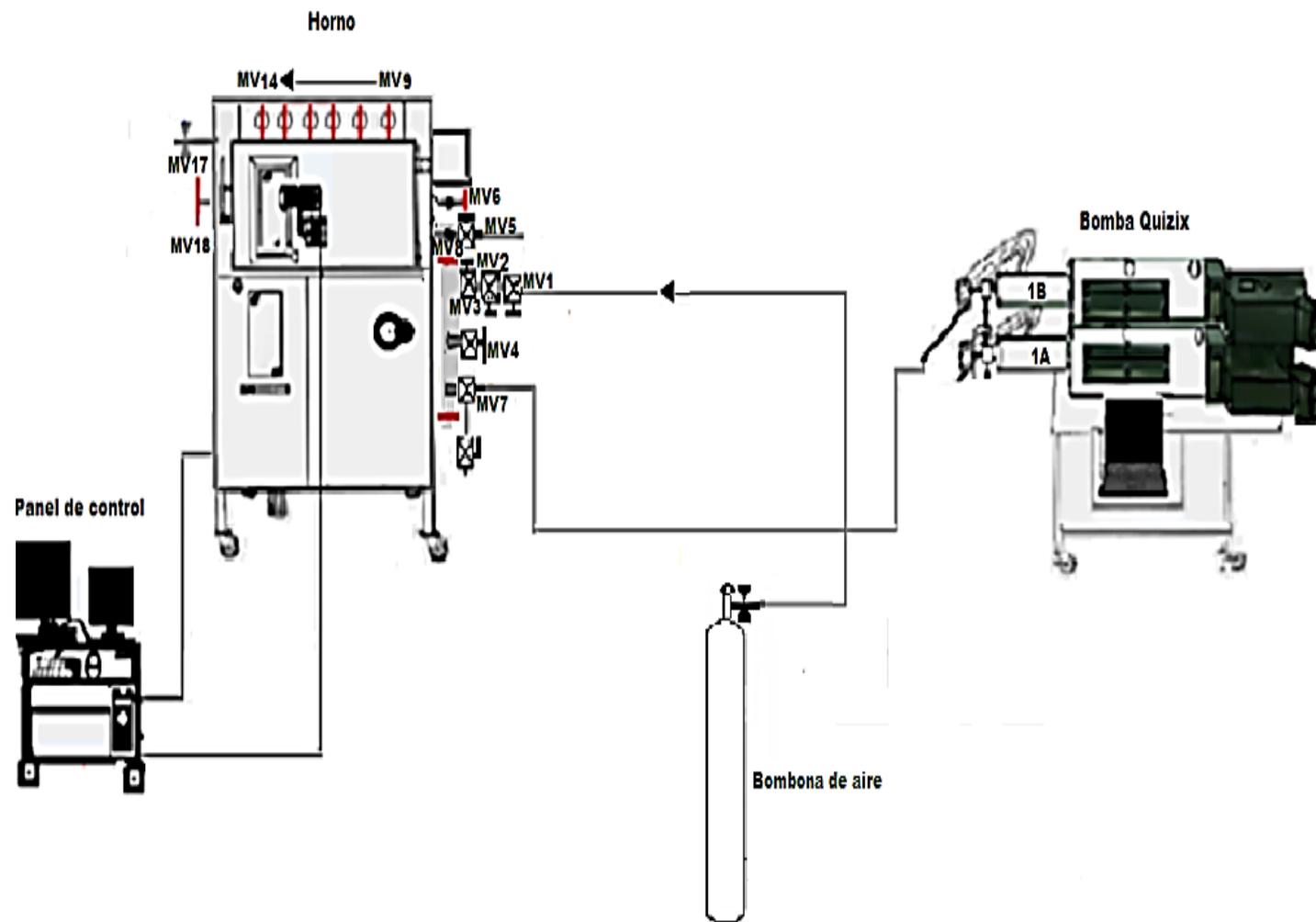


Figura 105. Esquema de los equipos de laboratorio para la calibración del volumen de la celda auxiliar.

Para calibrar el volumen de la celda auxiliar, se realiza el siguiente procedimiento:

- i. Asegurarse que la celda de gas condensado esté limpia y seca, y que su agitador magnético interno esté colocado dentro de la celda.
- ii. Encender los calentadores a un *set point* de temperatura del horno de 40°C, y permitir que la temperatura de la celda auxiliar alcance ese valor y se mantenga estable.
- iii. Conectar una bombona de aire al puerto *GAS IN/OUT* o al puerto *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT* localizados al costado derecho del sistema PVT. De aquí en adelante, se asumirá que la bombona de aire está conectada al puerto *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT*.
- iv. Aislar la celda de gas condensado del resto del sistema cerrando la válvula *CELL-TO-CELL ISOLATION VALVE*. Cerrar también la válvula *GAS IN/OUT VALVE*.
- v. Cargar la celda de gas condensado con aire a una presión lo suficientemente alta para permitir trasladar el pistón flotante a la posición más alta (máximo volumen de la cámara de gas de la celda de gas condensado). Con una presión de aire en el rango de 300 lpc a 500 lpc es suficiente. Simultáneamente, retirar aceite hidráulico del tope de la celda auxiliar mediante el uso de la bomba Quizix. Para ello, ajustar la bomba a tasa constante a un *set point* de 30 ml/min; verificar que la dirección del pistón de la bomba indique retractar.
- vi. Cambiar la tasa de la bomba a un *set point* de 10 ml/min al momento de observar en el panel de control PVT 3000 que el pistón de la celda auxiliar se desplaza hacia arriba aumentando considerablemente el volumen de la celda.
- vii. Registrar el volumen máximo, y cerrar la válvula *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT VALVE* (asumiendo que la bombona de aire está conectada al puerto *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT*).
- viii. En la pantalla principal del programa PVT 3000, seleccionar *Calibration... Auxiliary Cell... Volume Calibration* – la ventana de dialogo “Calibración de volumen de la celda auxiliar” aparecerá en pantalla (véase figura 106).

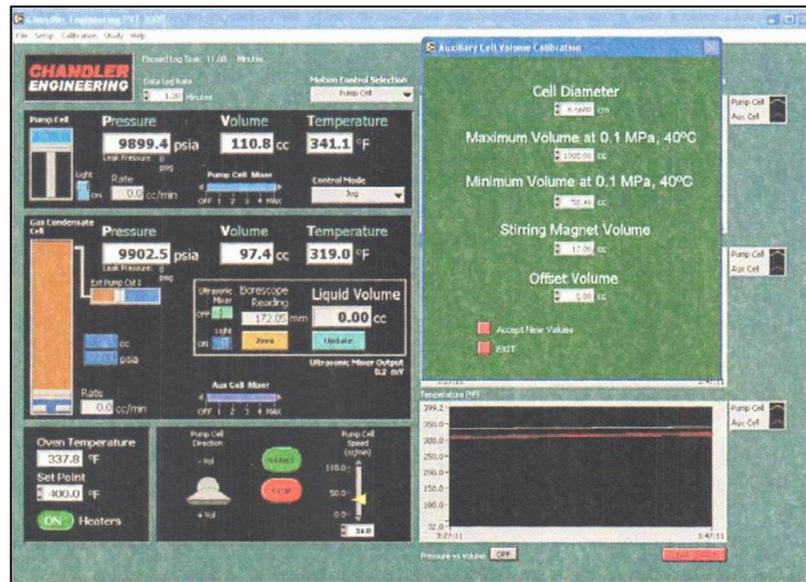


Figura 106. Calibración de volumen de la celda auxiliar.

Fuente: (Chandler, 2009).

- ix. Asegurarse que el diámetro de la celda (*Cell Diameter*) sea igual al diámetro interno de la celda de gas condensado- chequear los dibujos del ensamblaje de la celda de gas condensado (en la sección A3.0 del Apéndice A del manual de instrucciones) para un valor apropiado del diámetro.
- x. Para valores iniciales, introducir el volumen máximo registrado para *Maximum Volume* a 0,1 MPa, 40°C. 40 cc para *Minimum Volume* a 0,1 MPa, 40°C. 0 cc para *Stirring Magnet Volume* y 0 cc para *Offset Volume*.
- xi. Presionar el botón aceptar nuevos valores (*Accept new values*).
- xii. Mediante el uso de la bomba de vacío, purgar todo el aire atrapado desde las líneas de aceite y desde el tope (aceite hidráulico) de la cámara de la celda de gas condensado.
- xiii. En el panel de control del programa *PumpWorks*, ajustar la presión de seguridad a un valor de 15000 lpc.
- xiv. Seguidamente, inyectar aceite hidráulico hacia el tope de la celda de gas condensado a tasa constante, a un *set point* de 20 ml/min. La presión de la celda auxiliar comenzará a incrementar a medida que el aire contenido en ella

es comprimido. Para ello, verificar que la bomba este en su máxima capacidad y que la dirección del pistón indique extender; además, la válvula de carga debe estar cerrada y la válvula de entrega abierta.

xv. Se necesitará recargar la bomba durante el proceso de inyección (cuando se entregue la capacidad total de la bomba de 135 cc). Para ello, se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

- Cerrar la válvula de entrega.
- Disminuir la presión de la bomba. Para ello, configurar la bomba en modo presión constante a un *set point* de 50 lpc y presionar *start*.
- Al alcanzar el *set point* deseado, presionar *stop* y abrir la válvula de carga.
- Ajustar la bomba a tasa constante a un *set point* de 50 ml/min, y presionar *start*. El fluido será transferido del reservorio al cilindro hasta alcanzar la posición *Max Retract*.
- Cerrar la válvula de carga, abrir la válvula de entrega, ajustar la dirección a *Extend*, e iniciar el cilindro.

xvi. Repetir desde el paso xiv hasta alcanzar el volumen mínimo de la celda o una presión de 15000 lpc en la celda. Registrar el volumen.

xvii. Cuando el pistón flotante llegue al fondo, la presión de la celda auxiliar permanecerá constante, pero la presión de la bomba externa continuará incrementando. Detener la bomba en este momento.

**Nota:** no exceder la máxima presión permitida para la bomba, la cual puede ser menor que la máxima presión permitida para la celda de gas condensado.

xviii. Permitir que la presión dentro de la celda de gas condensado se estabilice para asegurar que no hay fugas en el sistema.

xix. Cuidadosamente (lentamente) retirar el aire de la celda hasta que la presión de la celda auxiliar esté a la presión ambiente (barométrica, laboratorio), la cual debe ser aproximadamente 0,1 MPa absoluta (14,7lpc). Para ello, abrir la válvula *GAS IN/OUT VALVE (MV17)* y *GAS IN/OUT (MV5)*, en ese orden.

**Nota:** la descompresión rápida puede dañar los sellos.

- xx. Actualizar el valor del volumen mínimo registrado en la ventana de dialogo “Calibración de volumen de la celda auxiliar” (véase paso viii).
- xxi. Finalmente, activar la bomba en reversa o drenar aceite desde la celda para aliviar toda la presión.

#### **4.6. Calibración del transductor de presión.**

- i. En la pantalla principal del programa PVT 3000, seleccionar el icono del menú desplegable *Calibration... Auxiliary Cell... Pressure transducer calibration*.
- ii. Ingresar el valor de la presión barométrica (medida en el laboratorio) en lpca en la casilla de entrada correspondiente. Es importante resaltar que ésta debe ser una presión absoluta. Si no se conoce ésta presión, o no se puede medir de forma precisa, se recomienda ingresar un valor de 14,969 lpca.
- iii. Seleccionar el botón *calibrate transducer* para iniciar el procedimiento automático de calibración. Seguir las instrucciones que aparecen en pantalla.
- iv. Permitir al programa el tiempo necesario (15-20 segundos máximo) para completar el procedimiento automático de calibración.
- v. Una vez finalizado el procedimiento, hacer clic en el botón *close window* para retornar a la pantalla principal del programa PVT 3000.

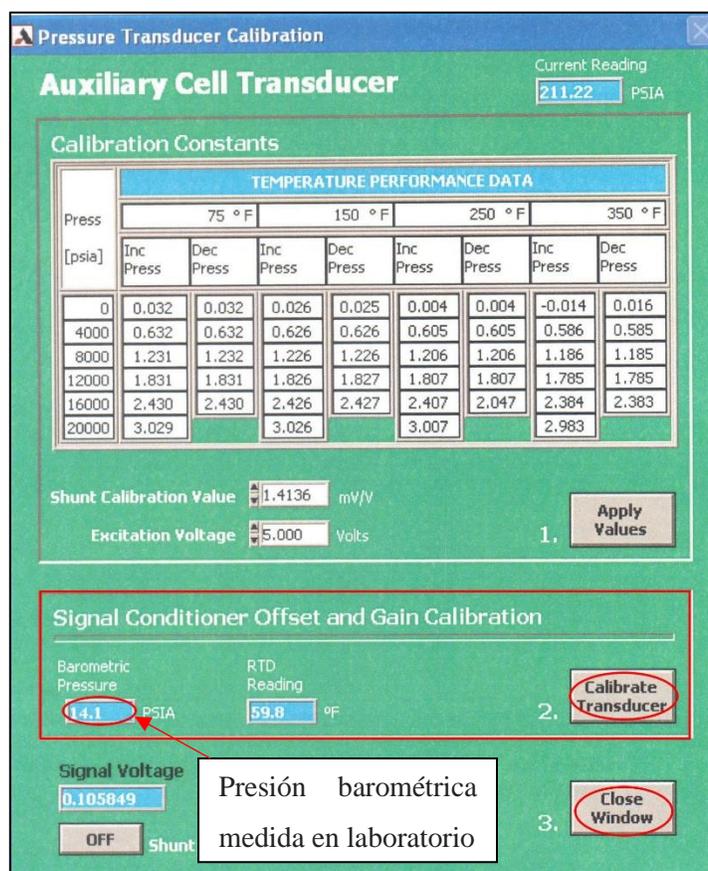


Figura 107. Pantalla de calibración del transductor de presión de la celda auxiliar.

Fuente: (Chandler, 2009).

#### 4.7. Calibración de la presión barométrica.

- i. Seleccionar el icono del menú desplegable *Calibration... Barometric Pressure Calibration* para acceder a la pantalla emergente del transductor de presión barométrica.
- ii. Este transductor de presión tiene una señal de salida de aproximadamente 0-5 VDC, correspondiente a aproximadamente 16-32" Hg (7,86 – 15,72 lpca, = 54 - 108kPa, = 0,54 – 1,08 bar) presión absoluta.
- iii. Revisar la hoja de calibración del fabricante del transductor (en la Sección A15.1 del Apéndice del manual de instrucciones), para el factor de calibración (*shunt cal factor*) de este transductor, e ingrese el valor en esta pantalla.

- iv. También, revisar la misma hoja de calibración para el factor de calibración del transductor, e ingrese este valor en la casilla de entrada *Shunt Cal Output* en esta pantalla.
- v. Para calibrar y llevar a cero el transductor, abrirlo a presión atmosférica e ingresar un valor de 0,0000 lpca para el Ajuste de Compensación del Usuario (*User Offset Adjustment*). Luego, hacer clic en el botón *calibrate transducer*.
- vi. Después, si se dispone de un estándar más preciso para la medición de la presión barométrica, ingresar un nuevo valor de ajuste de compensación del usuario (*user offset adjustment*) en esta pantalla, para llevar a “cero” el transductor ajustando la presión medida arriba o abajo ligeramente para coincidir con este estándar.
- vii. Al finalizar, hacer clic el botón *close window* para cerrar esta ventana y guardar cualquier cambio hecho (valores nuevos ingresados).

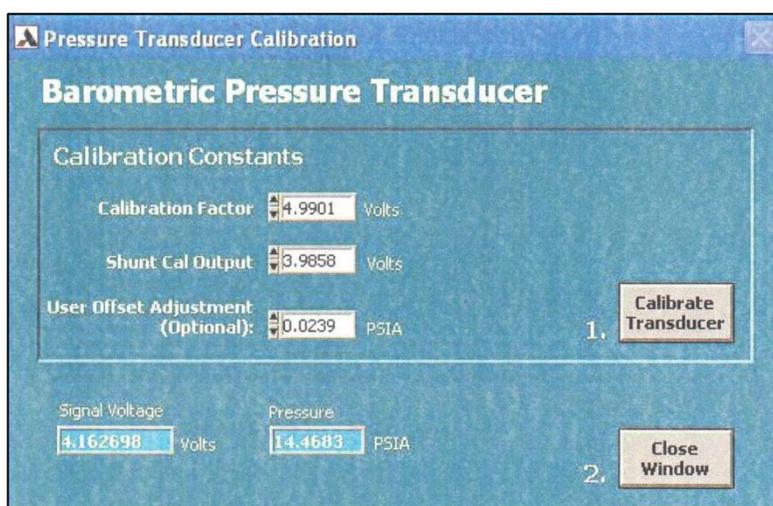


Figura 108. Pantalla de calibración del transductor de presión barométrica.

Fuente: (Chandler, 2009).

#### 4.8. *Mantenimiento de la celda de gas condensado.*

**Precaución:** asegurarse que el boroscopio haya sido completamente replegado (bajado) antes de instalar o remover la celda de gas condensado de la base, o moverla en lo más mínimo. De otro modo, el boroscopio se dañará.

### Desmontaje

- i. Permitir que el horno se enfríe después de realizada cualquier prueba a alta temperatura. El largo cuerpo de la celda de gas condensado retendrá el calor mucho más tiempo que el resto del sistema.
- ii. Es más fácil remover (y luego re-instalar) la celda de gas condensado desde (en) el horno con su pistón con vástago incorporado ajustado completamente en la posición más baja (mínimo volumen de la recámara de gas), de tal forma que el vástago del pistón se extienda la mínima longitud desde el tope de la celda. Inyectar aceite hidráulico desde la bomba externa, según sea necesario, para impulsar el pistón hacia el fondo, hasta que la presión del aceite hidráulico (bomba) aumente súbitamente. Mientras se inyecta aceite, es posible deducir que el pistón está en el fondo cuando el volumen de la celda auxiliar en la pantalla del programa PVT 3000 deje de cambiar, y mantenga el mismo valor. Rápidamente detener la bomba en este punto, y tratar de no permitir que la presión del aceite hidráulico (bomba) aumente por sobre 1000 – 2000 lpc (6,89 – 13,79 MPa). Luego, activar la bomba en reversa o drenar aceite hidráulico desde la celda para aliviar toda la presión desde la celda.
- iii. Liberar toda la presión desde la celda de gas condensado antes de desconectar cualquier sección de tubería o remover la celda del horno.
- iv. Desconectar el acoplamiento de la válvula *LIQUID CONDENSATE IN/OUT VALVE*, el cual engancha el vástago de la válvula a la extensión, dentro del horno. Usar una llave Allen de 7/64” para aflojar la abrazadera del acoplamiento, en el lado hacia la parte externa del horno, y halar la extensión del vástago de la válvula fuera del acoplamiento. No aflojar la otra abrazadera – permitir que el acoplamiento permanezca firmemente sujeto al vástago de la válvula *LIQUID CONDENSATE IN/OUT VALVE* de la celda de gas condensado.
- v. Desconectar los cables hacia el transductor de presión y mezclador acústico de la celda auxiliar, dentro del horno. Se recomienda no remover el transductor

de presión muy a menudo, además esto usualmente no es necesario. Si se hace necesario removerlo, usar la llave especial delgada de 1" y extremo abierto provista en el kit de herramientas del sistema PVT (véase figura 109).

- vi. Desconectar todas las tuberías de la celda, usando una llave de 5/8" de extremo abierto para aflojar las tuercas de las conexiones de las tuberías.
- vii. Usando una llave Allen de 3/32", remover la mitad de los tres tornillos que sostienen la barra de amarre hacia el tope del vástago (extensión).
- viii. Usando una llave Allen de 5/64", aflojar los cuatro tornillos que sujetan el tubo de soporte del transductor hacia la tapa insertada en el tope.
- ix. Halar el tubo de soporte del transductor hacia arriba lo suficiente para acceder a los anillos con caras planas para llave, en el vástago del pistón y tope del vástago (extensión). Usar dos llaves 3/16" de extremo abierto para desatornillar estos uno de otro, y luego halar el ensamblaje completo del sensor de flujo (incluyendo el tope del vástago y el tubo de soporte del transductor) fuera del horno y colocarlo horizontalmente en el tope del horno, tener cuidado de no tirar del cable del cabezal del codificador lineal.
- x. Si el pistón no está en la posición completamente hacia abajo (mínima longitud del vástago del pistón al extenderse fuera del tope de la celda), se debe usar una llave 3/16" de extremo abierto en el anillo con cara plana para llave del vástago para desatornillar el vástago del pistón, y remover el vástago hacia el exterior a través del tope del horno. Tener mucho cuidado de no rayar la superficie pulida exterior del diámetro externo de este vástago.
- xi. Advertencia: asegurarse que el boroscopio haya sido bajado por completo antes de instalar o remover la celda de gas condensado de la base. Si no es bajado lo suficiente, el costoso boroscopio y su tubo de espejo exterior se dañaran cuando se incline la celda de gas condensado y sea removida del horno.
- xii. Usando un destornillador Phillips, remover el tornillo que sostiene el anillo magnético externo a la barra vertical. Remover el anillo magnético externo del

horno, lo cual pudiera requerir inclinar la celda de gas condensado ligeramente.

- xiii. Cuidadosamente levantar la celda de gas condensado de la base y extraerla del horno. La celda es muy pesada, aproximadamente 89 lbs (40 kg), lo que puede requerir la asistencia de dos personas.
- xiv. Si no se ha retirado, remover el vástago del pistón desatornillándolo, para ello usar una llave 3/16" en el anillo con cara plana para llave. Se recomienda sacar este vástago completamente fuera de la celda.

**Precaución:** tener mucho cuidado de no rayar la superficie pulida sellante del diámetro externo de este vástago.

- xv. Usando dos llaves tipo gancho grandes (una 3/8" y otra 1/4"), desatornillar la cubierta superior del cuerpo.
- xvi. Drenar cualquier residuo de aceite hidráulico que pudiera permanecer en el lado de aceite hidráulico del pistón.
- xvii. Usando una llave tipo gancho de 1/4" para sostener la cubierta inferior y una llave tipo gancho de 3/8" para sostener el cuerpo, desatornillar la cubierta inferior del cuerpo.
- xviii. Empujar el pistón (véase ítem 10 en figura 65) fuera del cuerpo usando una pieza larga de material suave (latón, madera, etc.) de manera que no raye el orificio pulido (diámetro interno) del cuerpo.
- xix. Usando una llave tipo gancho con pasadores de 3/16" de diámetro, desatornillar la tuerca de retención exponiendo la ventana de cuarzo (véase ítem 21 en figura 65) y los sellos circundantes. La arandela de cobre pudiera permanecer presionada dentro de la tuerca de retención.
- xx. Para remover la ventana de cuarzo, cuidadosamente empujarla hacia afuera desde el extremo opuesto (tope cuando está instalada en el horno). El ensamblaje del sello de la ventana y el anillo retenedor de metal (véase ítem 8 en figura 65) pudieran extraerse con la ventana, pero si no, cuidadosamente removerlos de la cubierta inferior empujando en el otro lado del anillo retenedor de metal (tope cuando la celda está instalada en el horno), o

extrayéndolos cuidadosamente del fondo con la varilla de latón para remover anillos tipo o-ring, herramienta especial incluida en el kit de herramientas del sistema PVT, la cual se muestra en la figura 109.



Figura 109. Varilla de latón para remover anillos tipo o-ring.

- xxi. De ser necesario, remover el sello secundario tipo o-ring (baja presión) sobre la cubierta inferior, usando la varilla de latón para remover anillos tipo o-ring. Tener mucho cuidado de no rayar las superficies pulidas sellantes.
- xxii. Para remover el extenso ensamblaje del sello TFE de la cubierta inferior, primero remover el anillo retenedor espiral. Remover el anillo retenedor espiral muy cuidadosamente, usando un destornillador o la varilla de latón (véase figura 109) para levantar el extremo del anillo lejos de la ranura en la cubierta, y luego cuidadosamente extraerlo de la ranura en un movimiento en forma de espiral. Tener mucho cuidado de no rayar las superficies pulidas sellantes. Posteriormente, remover el ensamblaje del sello TFE, teniendo mucho cuidado de no rayar las superficies pulidas sellantes. Si es necesario, hacer palanca con la varilla de latón para levantar el ensamblaje del sello de la cubierta inferior.
- xxiii. El extenso ensamblaje del sello TFE sobre la cubierta superior es idéntico al de la cubierta inferior, y se remueve de la misma manera.

- xxiv. El pequeño ensamblaje del sello TFE en el vástago del pistón (véase ítem 25 en figura 65) es removido desatornillando el inserto de la cubierta superior de la cubierta superior, usando una llave tipo gancho de 3/16". El ensamblaje del sello usualmente se mantendrá en la cubierta superior. Si es así, muy cuidadosamente extraerlo usando la varilla de latón para remover anillos tipo o-ring.
- xxv. El extenso ensamblaje del sello TFE en el pistón es similar a los usados en las cubiertas superior e inferior, y es removido de la misma manera.
- xxvi. El pequeño ensamblaje del sello TFE en el agitador acústico es removido desatornillando el agitador acústico de la cubierta del fondo, usando la herramienta especial delgada de 1" y extremo abierto (véase figura 110), provista en el kit de herramientas del sistema PVT. El ensamblaje del sello usualmente se mantendrá en la cubierta inferior. Si es así, muy cuidadosamente extraerlo usando la varilla de latón para remover anillos tipo o-ring.



Figura 110. Herramienta especial para remover sellos TFE.

- xxvii. Los sellos pequeños en el vástago de la válvula *LIQUID CONDENSATE IN/OUT VALVE*, en la cubierta inferior normalmente no necesitan ser reemplazados. Frecuentemente, y en caso de presentar fugas, ya que están recubiertos con teflón, simplemente ajustar la tuerca del vástago de la válvula

hasta que deje de fugar, y continuar usándolos. Para hacer esto, remover primeramente el tornillo y arandela de seguridad, usando una llave Allen de 5/32”, lo cual bloqueara el retenedor en su lugar. Remover el retenedor y usar una llave ajustable para aflojar y remover la tuerca de la cubierta inferior. El ensamblaje del vástago de la válvula se saldrá con la tuerca. Si la arandela de respaldo de diámetro extenso y hecha de metal no se sale con el vástago de la válvula, removerla cuidadosamente, usando la varilla de latón (véase figura 109). Normalmente, los dos anillos de respaldo pequeños de metal y las dos empacaduras TFE se mantendrán ajustadas fuertemente en la cubierta del fondo, y puede ser difícil removerlas. Si no es posible removerlas extrayéndolas con la varilla de latón o un destornillador pequeño, intentar removerlas con una broca para taladros o con un extractor de tornillos. Tener mucho cuidado de no rayar la superficie del diámetro interno. Los anillos de respaldo de metal y sellos probablemente se dañen durante la extracción, y probablemente no puedan ser reusados.

#### Reensamblaje

- i. Reensamblar en orden inverso. Los detalles se muestran a continuación.
- ii. Cuidadosamente limpiar todas y cada una de las partes removidas, antes de reinstalarlas en la celda de gas condensado. Cuidadosamente limpiar las superficies sellantes con un paño suave.  
Precaución: No usar nada que pueda rayar las superficies sellantes de las partes de metal, o dañar las superficies sellantes delicadas de los sellos TFE.
- iii. Para mejorar el sellado, usar una cantidad muy pequeña de lubricante de alta-temperatura para o-ring (como la grasa de vacío de silicona incluida en el kit de herramientas del sistema PVT) en todos los sellos nuevos y reusados antes de instalarlos en la celda.
- iv. Cuidadosamente reinstalar el anillo retenedor de metal (véase ítem 8 en figura 65) en el fondo de la cubierta inferior, hasta que se detenga en la cuneta. El lado biselado debe estar hacia el fondo de la cubierta del fondo (hacia la

cuneta biselada en la ventana). Cuidadosamente instalar un nuevo ensamblaje de sello para ventana en el fondo de la cubierta inferior. Tener cuidado de no rayar la superficie pulida sellante en la cubierta de metal inferior, y no dañar los delicados bordes sellantes de este sello TFE enroscado con teflón. Este es un sello conformado por tres piezas, con el sello TFE instalado primero (hacia lo que es el tope de la celda cuando se instala en el horno), con el extremo abierto del sello en forma de U hacia el anillo retenedor de metal. Seguidamente se ubica el v-ring TFE negro de este ensamblaje de sello, con el extremo abierto de la V hacia el sello en forma de U recién instalado. Por último, instalar la tercera pieza del ensamblaje de sello, el anillo negro de respaldo (forma de V en un lado, plano en el otro), con el extremo abierto de la V hacia el sello V del medio recién instalado. Manualmente, empujar cuidadosamente la ventana (véase ítem 21 en figura 65) hacia y a través del ensamblaje de sello, hasta que se detenga en el anillo de retención de metal. Luego, usando una llave tipo gancho de 3/16" atornillar la tuerca de retención, con la arandela en su sitio dentro de la tuerca, bajarla hacia la cubierta inferior, justo hasta que se detenga.

- v. Colocar la cubierta inferior en posición vertical, con su fondo recostado en la plataforma superior, y manualmente enderezar la ventana de cuarzo, centrándola en la cámara de líquido. Cuando posteriormente sea presurizada, la presión forzando la ventana hacia abajo contra la arandela plana automáticamente enderezará la ventana.
- vi. Re-instalar el ensamblaje de sello de tres piezas sobre la cubierta inferior. El anillo de respaldo (con forma de V en un lado, y plano en el otro) se ubica primero, en el fondo, con su lado plano hacia el fondo, y el extremo abierto de la V hacia el tope de la celda. Luego, sigue el anillo negro TFE en forma de V, con el extremo abierto de su V hacia el tope de la celda. Luego, muy cuidadosamente instalar el sello TFE en forma de U enroscado con teflón, con el extremo abierto de su U hacia el tope de la celda, hacia la presión. Finalmente, cuidadosamente re-instalar el anillo espiral de retención

manualmente (sin ninguna herramienta), aplicando un movimiento en espiral, para ubicarlo hacia su ranura en la cubierta inferior.

- vii. El pequeño ensamblaje de sello TFE en el agitador acústico (véase ítem 24 en figura 65) es re-instalado empujando cuidadosamente en el sello TFE de regreso hacia el hoyo en la cubierta inferior, con el extremo abierto de su U hacia el interior de la cubierta. Tener mucho cuidado de no rayar la superficie sellante pulida interna de la cubierta de fondo y agitador acústico, y de no dañar los delicados bordes sellantes de este sello TFE enroscado con teflón. Seguidamente, instalar el v-ring negro TFE de este ensamblaje de sello, con el extremo abierto de la V hacia el sello con forma de U recién instalado. Luego, instalar la tercera pieza del ensamblaje de sello, el anillo de respaldo (forma de V en un lado, plano en el otro), con el extremo abierto de la V hacia el sello V del medio recién instalado. Finalmente, usando la herramienta especial delgada de 1" y extremo abierto (véase figura 110), atornillar el agitador acústico (véase ítem 24 en figura 65) de vuelta en la cubierta inferior, hasta que se detenga. No ajustar más allá del punto donde se detenga con mínimo torque. No es necesario o deseable un ajuste adicional ya que esto solo dificultará más su extracción la próxima vez.
- viii. Si los pequeños sellos (empacaduras TFE) en el vástago de la válvula *LIQUID CONDENSATE IN/OUT VALVE*, en la cubierta inferior fueron removidos, reemplazarlos. Primero, instalar un anillo de respaldo de metal en el fondo del hoyo (con su lado biselado, y oblicuo abajo en la celda), seguido de dos empacaduras TFE. Luego, instalar el otro anillo de respaldo de metal en el tope del primero (con su lado biselado, y oblicuo apuntando arriba hacia el exterior). Colocar la arandela de respaldo de metal de diámetro extenso sobre el tope de estos, con el orificio apuntando hacia arriba. Antes de instalar la empacadura de la tuerca del vástago de la válvula, girar el vástago de la válvula varias veces en sentido anti-horario para levantarlo, y asegurarse que el vástago de la válvula no se dañe por haberlo presionado forzosamente sobre el asiento de la válvula al momento de ajustar la empacadura de la tuerca.

Posteriormente, instalar la empaadura de la tuerca y el ensamblaje del vástago de la válvula, y ajustar la empaadura de la tuerca, usando una llave ajustable, hasta que esté muy ajustada, de esta manera la empaadura estará lo suficientemente apretada para sellar el gas a alta presión y temperatura. Colocar el retenedor (anillo de bloqueo) sobre la empaadura de la tuerca del vástago de la válvula y bloquearlo en su lugar con la arandela de seguridad, usando una llave Allen de 5/32”.

- ix. El extenso ensamblaje del sello TFE en la cubierta superior es idéntico al de la cubierta inferior, y es instalado en la misma manera, excepto por el extremo abierto en forma de V del anillo de respaldo y el sello en forma de U, los cuales apuntan hacia el fondo de la celda, hacia la presión. Tener mucho cuidado de no rayar las superficies sellantes pulidas de la cubierta superior de metal o de dañar la superficie sellante delicada de este sello TFE.
- x. El pequeño ensamblaje de sello TFE en el vástago del pistón es re-instalado empujando cuidadosamente en el sello TFE de regreso hacia el hoyo en la cubierta superior, con el extremo abierto de su U hacia el fondo de la cubierta (hacia la presión). Tener mucho cuidado de no rayar la superficie sellante pulida interna de la cubierta superior, y no dañar los bordes sellantes delicados de este sello TFE enroscado con teflón. Seguidamente, instalar el v-ring negro TFE de este ensamblaje del sello, con el extremo abierto de la V hacia el sello con forma de U recién instalado. Luego, instalar la tercera pieza del ensamblaje del sello, el anillo de respaldo (forma de V en un lado, plano en el otro), con el extremo abierto de la V hacia el sello del medio recién instalado. Finalmente, usando una llave tipo gancho de 3/16”, atornillar el inserto de la cubierta superior de regreso en la cubierta superior, hasta que se detenga. No es necesario o deseable un ajuste adicional ya que esto solo dificultará más su extracción la próxima vez.
- xi. El extenso ensamblaje del sello TFE en el pistón es similar a los usados en las cubiertas superior y del fondo, y es instalado en la misma manera, excepto por el extremo abierto en forma de V del anillo de respaldo y el sello en forma de

U, los cuales apuntan hacia el exterior del pistón, hacia la presión en cada cámara. Es de hacer notar que este ensamblaje del sello incluye un ensamblaje de sello de tres piezas para cada lado del pistón, para sellar en ambas direcciones, y un anillo guía de bronce de dos piezas para centrar el pistón y evitar que el propio pistón roce y raye el orificio pulido del cuerpo. Finalmente, cuidadosamente re-instalar manualmente los anillos retenedores espirales, usando un movimiento en espiral, para ajustar cada uno en su ranura en el pistón.

- xii. Empujar el pistón (con los sellos instalados) atrás hacia el fondo del cuerpo, usando una pieza larga de material suave (latón, madera, etc.) de manera que no raye el orificio pulido (diámetro interno) del cuerpo. El lado del vástago debe estar arriba, hacia lo que es el tope del cuerpo cuando la celda está instalada en el horno. Nótese que el cuerpo no es simétrico: los extremos del tope y fondo de la celda no son idénticos. El puerto *GAS IN/OUT* y el puerto del transductor de presión están más cercanos al fondo.
- xiii. Reinstalar el anillo magnético interno (véase ítem 26 en figura 65) en el cuerpo. Es de hacer notar que se debe colocar con el lado adecuado hacia arriba, para proporcionar el máximo acoplamiento magnético con el anillo magnético externo. Para determinar la orientación correcta, colocar el anillo magnético interno dentro del anillo magnético externo: girar el anillo interno de arriba hacia abajo para observar cuál orientación proporciona el acoplamiento magnético más fuerte entre las dos partes.
- xiv. Usando una llave tipo gancho de 1/4" en la cubierta inferior y una llave tipo gancho de 3/8" en el cuerpo, atornillar la cubierta inferior de vuelta en el cuerpo, hasta que se detenga. No ajustar más allá del punto donde se detenga con mínimo torque. No es necesario o deseable un ajuste adicional ya que esto solo dificultará más su extracción la próxima vez.
- xv. Si el pistón no está ya ubicado en el fondo, usar una pieza larga de algún material limpio y suave (latón, madera, etc.) de manera que no raye el orificio pulido (diámetro interno) del cuerpo, para empujarlo hacia el fondo,

hasta que toque la cubierta del fondo. No permitir que gravilla o cualquier partícula se adhiera al objeto y raye la celda.

- xvi. Colocar la celda erguida, y verter aceite hidráulico hacia la cámara superior, por encima del pistón. Verter justo lo suficiente para que cuando la cubierta superior sea re-instalada, un pequeño volumen de aceite se desborde a través del puerto *HYDRAULIC OIL IN/OUT* de la cubierta superior, para expeler el aire de esta cámara superior.
- xvii. Usando una llave tipo gancho de 1/4" en la cubierta superior y una llave tipo gancho de 3/8" en el cuerpo, atornillar la cubierta superior de vuelta en el cuerpo, hasta que se detenga. No ajustar más allá del punto donde se detenga con mínimo torque. No es necesario o deseable un ajuste adicional ya que esto solo dificultará más su extracción la próxima vez.
- xviii. Cuidadosamente, empujar el vástago del pistón (véase ítem 25 en figura 65) a través de la cubierta superior y retenedor de la cubierta superior, mientras se rota, tratando de no dañar el ensamblaje del sello. Atornillar el vástago de vuelta en el pistón hasta que esté muy ajustado, usando una llave 3/16" de extremo abierto en las caras planas del vástago. Precaución: ensartar completamente el vástago del pistón en el pistón, con ninguna muesca visible en la parte externa del pistón, hasta que se detenga (aproximadamente 0,35", o 8,9 mm de viaje desde la inserción inicial en las muescas), y esté apretado fuertemente en el pistón, para retener el vástago y prevenir su eyección bajo presión. Alternativamente, antes de colocar el pistón dentro del cuerpo de la celda, es posible instalar el vástago del pistón en el pistón, y visualmente asegurarse que el vástago esté apretado fuertemente en el pistón.
- xix. Instalar un tapón en el puerto *HYDRAULIC OIL IN/OUT* de la cubierta superior, para prevenir que el aceite se derrame al mover la celda.
- xx. Colocar la celda de gas condensado de vuelta en el horno, hasta que el orificio en la tuerca de retención inferior este centrado en el pequeño extremo saliente de la placa base gruesa de 1/4" sobre el piso del horno, con el fondo plano de la celda descansando en esa placa base.

- xxi. Seguidamente, re-instalar las otras partes (anillo magnético externo, tuberías, y ensamblaje del sensor de carrera) en orden inverso (pasos 4 al 12 en la sección Desmontaje antes descrita, ejecutados en orden inverso del 12 al 4).
- xxii. Usar gas nitrógeno a baja presión, aire, o cualquier otro gas conveniente, inyectado en el puerto *GAS IN/OUT* de la celda, para impulsar el aceite hidráulico fuera del tope de la celda (con una válvula abierta o tubería desconectada), hasta que todo el aire sea expelido de la cámara superior de la celda de gas condensado. Luego, re-ajustar cualquier tubería desconectada o cerrar cualquier válvula abierta.

#### **4.9. *Mantenimiento del cilindro portamuestra.***

En esta sección se establecen los pasos a seguir para reemplazar los sellos de seguridad (O-ring y pistas) instalados en el cilindro portamuestra, parte integral del sistema PVT libre de mercurio –Modelo 3000.

- i. Vaciar toda la muestra de fluido desde el cilindro antes de comenzar.
- ii. Empujar el pistón hacia el extremo hidráulico del cilindro para vaciar la cámara de fluido hidráulico y permitir un fácil acceso a los sellos o-ring en el pistón.
- iii. Purgar toda la presión desde el cilindro (a ambos lados del pistón).
- iv. Remover los anillos retenedores en ambos extremos del cilindro.
- v. Remover ambos cabezales de los extremos del cilindro. Chequear que el o-ring y las pistas de cada cabezal no tengan fisuras y estén colocados correctamente. El o-ring tiene una sección transversal circular, y debe estar ubicado en medio de las dos pistas; las pistas tienen una sección cóncava, la cual debe apuntar hacia el o-ring. Reemplazar los sellos si es necesario.
- vi. Remover el pistón flotante y chequear los sellos en él. Reemplazar los sellos si es necesario.

## **5. Ejecución de estudio PVT para determinar las propiedades termodinámicas y composición del fluido**

Los estudios PVT a efectuar en esta investigación son: (a) Proceso de liberación instantánea en una etapa, (b) Proceso de expansión a composición constante, y (c) Agotamiento a volumen constante. Estos estudios son necesarios para el alcance formulado en la puesta a punto del sistema Chandler PVT 3000 para caracterizar el fluido del yacimiento. Por tal motivo se requiere de seguir las instrucciones de trabajo que se exponen en esta fase.

### **5.1. Obtención de muestras de fluidos de yacimiento**

La muestra sometida a estudio en esta investigación fue proporcionada por PDVSA-Intevep y corresponde a un fluido de tipo gas condensado, capturado a condiciones de fondo del pozo, en un campo del oriente de Venezuela. Por políticas de la empresa se omite el nombre del pozo, y el fluido pasará a identificarse como fluido WD.

### **5.2. Preparación de la muestra**

Tan pronto la muestra fue recibida en el laboratorio PVT, la misma fue revisada para verificar su representatividad. Con este propósito, se midió la presión de apertura del cilindro usando la bomba externa *Quizix*. Para ello, el cilindro fue colocado en un trípode y se conectó la válvula MV16 (véase figura 108) del mismo (fluido hidráulico) a la bomba 1A utilizando una línea de alta presión.

En esta técnica la bomba es configurada en modo presión constante a un *set point* de presión equivalente a la presión de cierre reportada en campo (dato), quedando presurizada la línea que conecta el cilindro con la bomba. Luego, se detiene la bomba y se abre la válvula del cilindro (MV16), y se chequea el comportamiento de presión del sistema; las presiones de la bomba y el cilindro deben igualarse. En caso de que la presión del sistema disminuya, es indicio que la presión del cilindro es

menor a la reportada en campo; esta presión debe ser registrada y comparada con la presión de fondo fluuyente reportada en campo (dato) para verificar condición de subsaturación de la muestra.

En lo concerniente a la temperatura, se colocó una cinta de calentamiento alrededor del cilindro y un controlador de temperatura (reostato) para calentar el cilindro con muestra a la temperatura del yacimiento. De igual manera, se instaló una termocupla al cilindro para monitorear la temperatura. El acondicionamiento de temperatura se efectuó con el cilindro conectado a la bomba, para controlar el incremento de la presión producto de la expansión del fluido al incrementar temperatura.

En la figura 111 siguiente, se muestra el proceso de preparación del cilindro portamuestra, ajustando cintas térmicas conectadas a su vez a termocuplas controladas por los respectivos reóstatos con el fin de acondicionar la muestra a la temperatura del yacimiento.



*Figura 111.* Disposición de cintas térmicas alrededor del cilindro portamuestra.

En la figura 112 siguiente, se puede observar la configuración completa de los equipos para el calentamiento de la muestra.

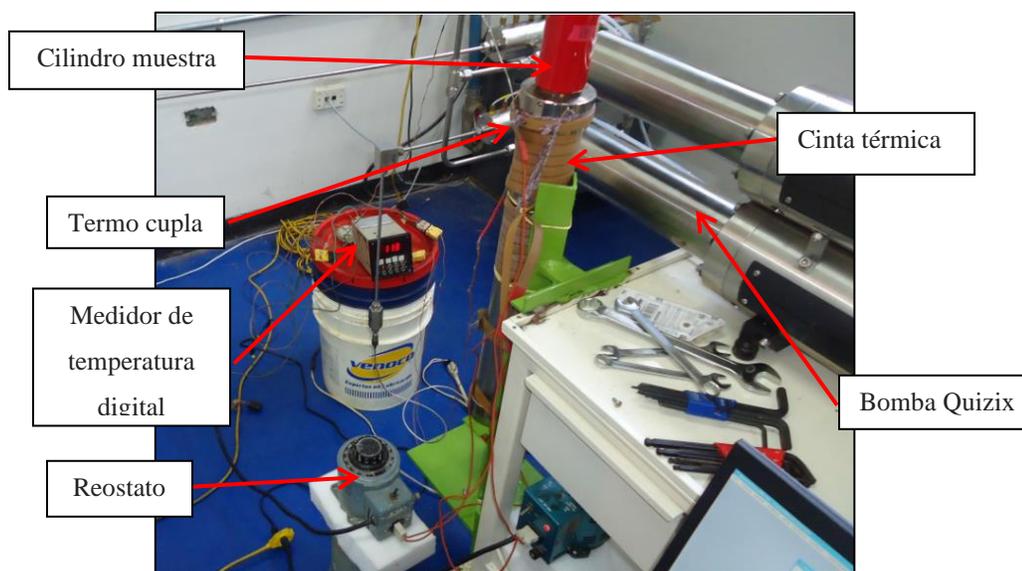


Figura 112. Calentamiento del cilindro portamuestra.

Posteriormente, se procedió a inyectar la muestra hacia la celda auxiliar para realizar las pruebas básicas para un gas condensado: (a) liberación instantánea (*flash*), (b) expansión a composición constante, y (c) agotamiento a volumen constante.

### 5.3. *Inyección de la muestra*

En esta sección se establecen los pasos a seguir para introducir una cantidad de fluido de fondo o recombinado hacia la celda auxiliar del sistema PVT modelo 3000.

El procedimiento de inyección está diseñado para ejecutarse por etapas, y busca preservar la integridad de la muestra, evitando caídas bruscas de presión que pudiesen generar la formación de una segunda fase, alterando su composición.

Los equipos utilizados para realizar este procedimiento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT 3000.
- Bomba Quizix.
- Cilindro portamuestra.
- Líneas y conexiones.

En la figura 113 presenta el diagrama de los equipos utilizados en la inyección.

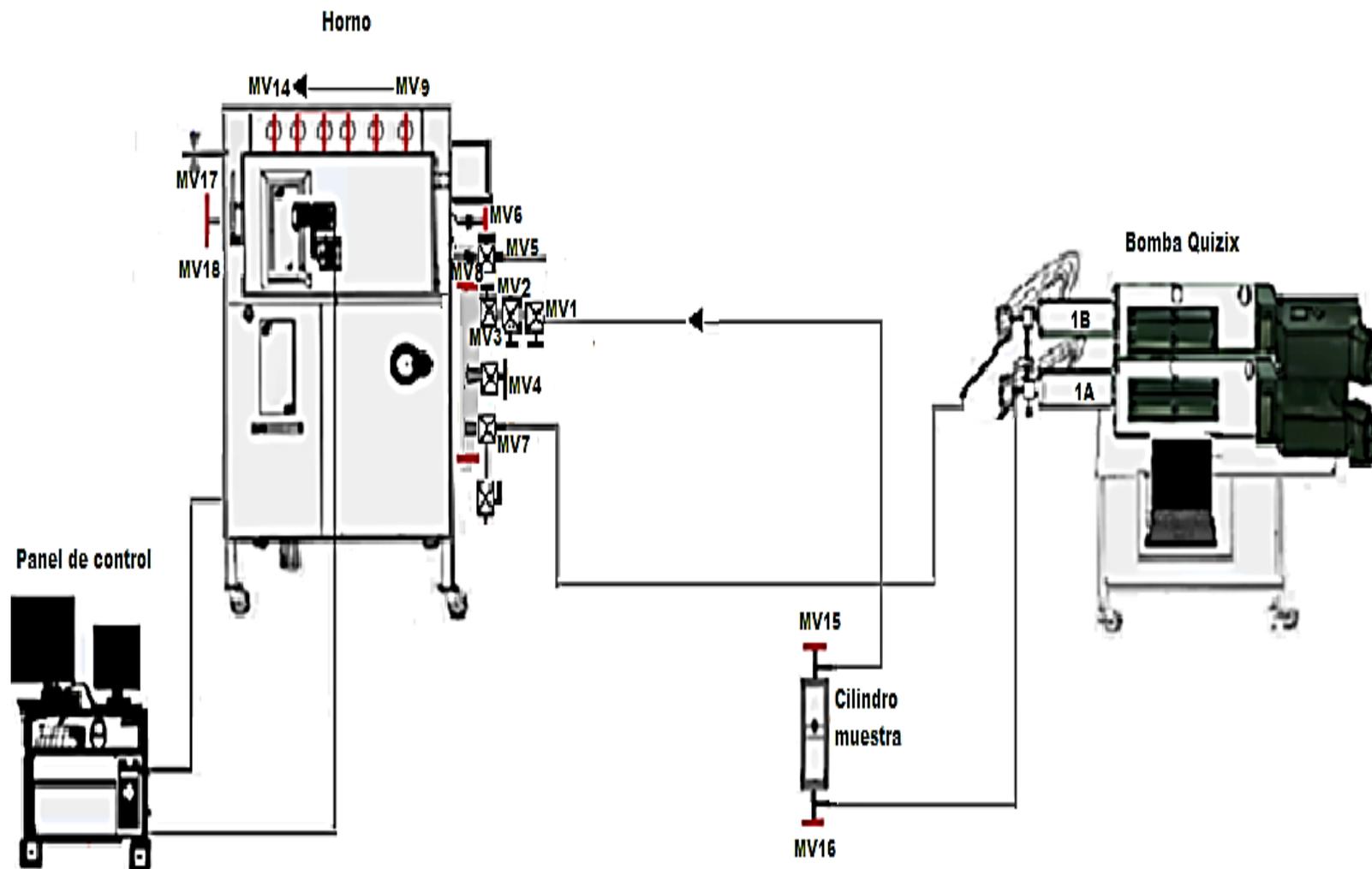


Figura 113. Esquema de los equipos de laboratorio para la inyección de la muestra.

Con la bomba 1A activada y configurada a presión constante e igual a la presión de apertura del cilindro (verificada), se procede a inyectar la muestra de acuerdo con el siguiente procedimiento. Es de hacer notar que el estado de la válvula de entrega del cilindro 1A, y la válvula MV16 del cilindro es abiertas.

- i. Conectar el extremo de muestra (MV15) del cilindro portamuestra con las válvulas de seguridad (MV1) del puerto *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT* mediante una línea de alta presión con conexión *straight* hembra en MV1 y conexión HIP en MV15.
- ii. Fijar la temperatura del sistema a la temperatura de trabajo en el panel de control de temperatura del programa PVT 3000 (véase figura 48). Para ello, seguir el siguiente procedimiento:
  - En la ventana principal del programa PVT 3000, ingresar la temperatura en la ventana *set point*. Es posible escribir el valor deseado de temperatura, o usar el ratón para cambiarlo con los botones de flechas localizados a la izquierda de la casilla de entrada.
  - Encender los calentadores presionando el botón rojo *OFF* ubicado debajo de la ventana *set point* – el botón cambiará a verde (*ON*).
  - Encender el interruptor del ventilador del horno y calentadores *OVEN FAN AND HEATERS* ubicado en el costado derecho inferior del sistema Chandler PVT 3000.
  - Monitorear la temperatura del horno actual en la pantalla del programa.
- iii. Esperar 15 minutos para que se caliente la celda a partir del momento que la temperatura indicada en el panel sea aproximada a la temperatura de trabajo y ésta se mantenga estable.
- iv. Ajustar la bomba 1B a presión constante a un *set point* de presión de 1500 lpc para garantizar volumen mínimo en la celda auxiliar. Previamente abrir la válvula *HYDRAULIC OIL IN/OUT VALVE* (MV7).
- v. Abrir las válvulas *AUXILIARY CELL CHARGE VALVE* (MV9), *GAS IN/OUT VALVE* (MV8), válvula de seguridad (MV5), *LIQUID CONDENSATE*

*IN/OUT VALVE* (MV6), MV1, MV2, Y MV3. Cerrar la válvula *CELL-TO-CELL ISOLATION VALVE* (MV10).

- vi. Calibrar el transductor de presión de la celda auxiliar (véase procedimiento técnico: Calibración del transductor de presión).
- vii. Realizar vacío a la celda auxiliar y a todas las tuberías conectadas a ella, hasta que la presión de la celda indique 0 lpc, aproximadamente por 20 minutos. Para ello, conectar una manguera de vacío a la válvula de tres vías MV2 y abrir la válvula. Al finalizar la succión, cerrar las válvulas en el siguiente orden: MV6, MV9, MV2, MV1, MV3, MV5 y MV8. Apagar la bomba de vacío y retirar la manguera.
- viii. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula del extremo de muestra del cilindro (MV15), (aproximadamente  $1^{1/2}$  vuelta), y con la bomba externa 1A desplazar el fluido a presión constante hacia las válvulas de seguridad cerradas (MV1). Esperar a que estabilice la presión, y registrar el volumen desplazado en esta etapa (MV15-MV1), indicado en la ventana principal del programa *PumpWorks* (casilla *Cylinder volume*).  
**Nota:** chequear que en la ventana *Current flow rate* del programa *PumpWorks* la tasa de flujo incremente ligeramente desde un valor igual a cero, y posteriormente retorne a cero. De esta manera se verifica que la inyección del fluido en la sección de tubería se realizó correctamente. Verificar para cada una de las etapas.
- ix. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV1, para llenar la tubería entre esta y la válvula MV3. Esperar que la presión se estabilice, y registrar el volumen desplazado en esta etapa (MV1-MV3).
- x. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV3, para llenar la tubería entre ésta y la válvula MV9. Esperar que la presión se estabilice, y registrar el volumen desplazado en esta etapa (MV3-MV9).
- xi. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV9, para llenar la tubería entre esta y la válvula MV6. Esperar que la presión se estabilice, y registrar el volumen desplazado en esta etapa (MV9-MV6).

xii. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV6 para inyectar el volumen mínimo de muestra de la celda.

**Nota:** es importante considerar que el volumen mínimo de la celda auxiliar es obtenido por medio de la calibración del volumen total de la celda, ver procedimiento correspondiente.

xiii. Compensar la presión sobre el pistón de la celda auxiliar. En este sentido, cuando la presión en la celda se aproxime a 1500 lpc, aumentar la presión de la cámara de aceite hidráulico aproximadamente 1000 lpc por encima de este valor, ajustando la presión de la bomba 1B. Esto con el propósito de mantener el pistón en el fondo de la celda (volumen mínimo de la celda).

**Nota:** el diferencial de presión ( $\Delta P$ ) generado sobre el pistón no debe exceder el valor de 5000 lpc.

**Nota:** es importante considerar el diferencial de presión existente entre la celda auxiliar y la bomba. Se debe introducir en la bomba 1B una presión menor al *set point* deseado para la celda auxiliar. De aquí en adelante se asumirá que este diferencial es tenido en cuenta por el usuario.

xiv. Repetir el procedimiento anterior manteniendo un  $\Delta P$  de 1000 lpc, hasta que la presión en la celda se aproxime a la presión del yacimiento. En este punto, disminuir el diferencial de presión, con el propósito de desplazar el pistón hacia arriba e incrementar el volumen de la celda hasta alcanzar el volumen de muestra deseado.

xv. En este punto, llevar el  $\Delta P$  a cero, incrementando la presión por encima del pistón (aceite hidráulico) hasta igualar la presión de la celda (presión de inyección). Esto permitirá mantener el volumen de muestra deseado en la celda a la presión de inyección especificada.

xvi. Cerrar todas las válvulas en el siguiente orden: MV6, MV9, MV3, MV1, MV15, y MV16.

xvii. Agitar la celda auxiliar por aproximadamente una hora, activando el interruptor *Auxiliary cell mixer* en el panel de control de la celda auxiliar (véase figura 46).

#### 5.4. Estudios experimentales (PVT)

Las instrucciones de trabajo para el estudio PVT convencional en el fluido WD a ejecutar en el sistema Chandler PVT 3000 se presentan en detalle a continuación. Adicionalmente, en el Apéndice B se proporcionan las instrucciones de trabajo para el caso de estudios PVT en muestras de petróleo negro y volátil.

##### 5.4.1. Proceso de liberación instantánea (*flash*) en una etapa.

Esta prueba se realiza con el propósito de determinar el comportamiento del fluido en los separadores a condiciones de campo.

Los equipos y sustancias químicas usados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT 3000.
- Gasómetro de doble celda. Modelo 2331d.
- Cilindro recolector de gas para análisis.
- Líneas y conexiones.
- Vial (que servirá como separador atmosférico).
- Balanza analítica.
- Bomba de vacío.
- Helio.
- Nitrógeno líquido.
- Compresor.

En la figura 114 se presenta un diagrama del montaje experimental para llevar a cabo este proceso.

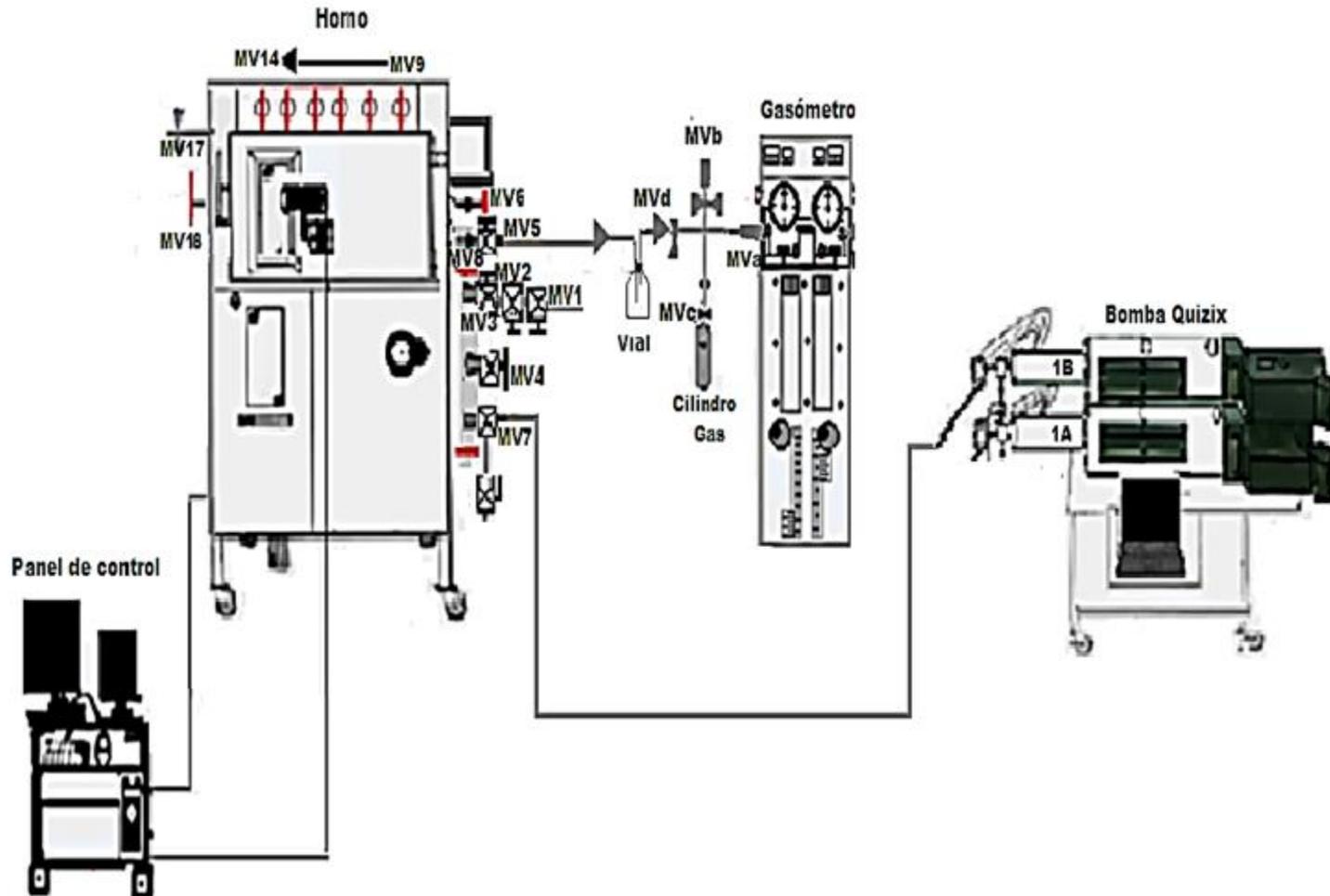


Figura 114. Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba liberación instantánea.

Las instrucciones de trabajo para realizar este experimento son las siguientes:

- i. Verificar que la muestra dentro de la celda PVT esté a condiciones monofásicas y a temperatura de yacimiento. Con este propósito, hacer uso del instrumento (boroscopio) integrado en la celda auxiliar.
- ii. Verificar que la válvula Ruska tipo L esté conectada al puerto de salida *GAS IN/OUT* (MV5).
- iii. Pesar un vial tapado, el cual es utilizado como un separador atmosférico para recolectar la muestra de líquido y seguidamente conectarlo a la aguja de salida del fluido.
- iv. Conectar desde el vial una línea flexible hasta la conexión tipo cruz que da acceso al gasómetro, y desde la parte inferior de la conexión tipo cruz, conectar un cilindro recolector de gas, el cual debe estar limpio y probado a fugas.
- v. Practicarle vacío al sistema conectado al equipo PVT (vial, cilindro recolector de gas, conexión tipo cruz, y línea) aproximadamente por 20 minutos (figura 115). Para ello, verificar que la válvula de tres vías del gasómetro (MVa) esté abierta hacia el puerto de venteo. Luego, conectar una manguera de vacío en la parte superior de la conexión tipo cruz y verificar que las válvulas de paso a la bomba de vacío (MVb), al cilindro (MVc), y al vial (MVd) permanezcan abiertas durante la succión (figura 116). Al terminar el vacío cerrar únicamente las válvulas MVc y MVb, en ese orden, y apagar la bomba de vacío.

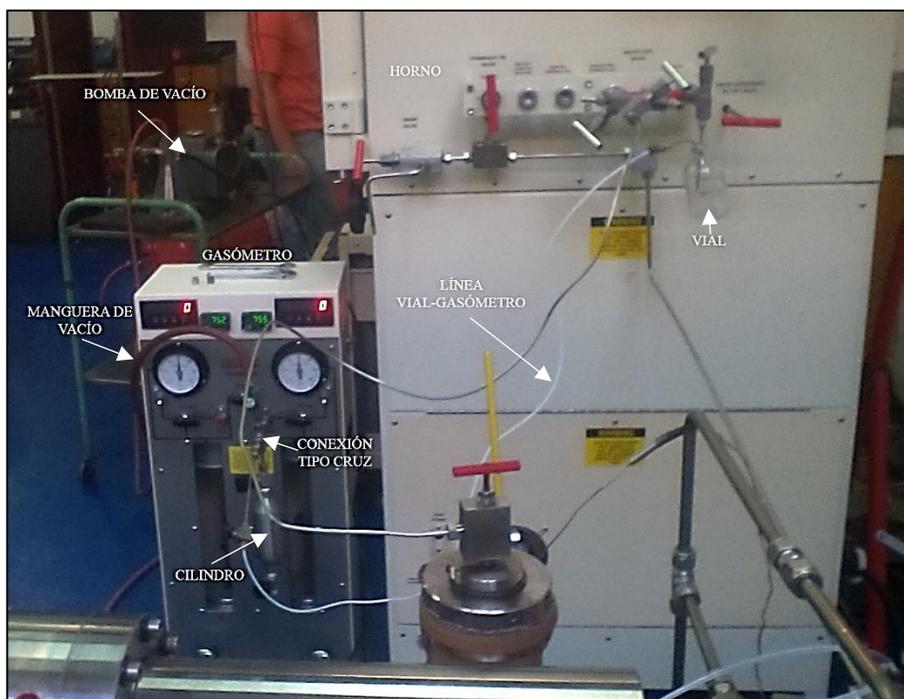


Figura 115. Componentes del montaje para el vacío.



Figura 116. Posición de las válvulas del gasómetro para el vacío.

- vi. Curar la cámara del gasómetro con helio. Para ello, verificar que la válvula de tres vías (MVa) esté abierta hacia el puerto de venteo y conectar la manguera de una bombona de helio en el puerto de venteo con un flujo de 500cc/min. Permitir que la cámara se llene con helio, luego retirar la manguera y drenar el helio hacia la atmosfera subiendo el pistón mediante la manipulación de la perilla del gasómetro. Repetir tres veces, dejando el helio en la cámara en el último llenado.  
**Nota:** el procedimiento para curar la segunda cámara es idéntico.
- vii. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada del gasómetro y enviar helio al sistema (conexión tipo cruz, línea, y vial). Esto con el fin de mantener equilibrado el sistema y eliminar la presión negativa.
- viii. Asegurarse de que las cámaras del gasómetro indiquen volumen igual a cero. Para ello, se debe drenar el volumen en exceso de helio hacia la atmosfera a través del puerto de venteo. Con este propósito, abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de venteo, y subir el pistón hasta el tope de la cámara manipulando la perilla del gasómetro.
- ix. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada y ajustar la presión interna a la presión atmosférica manipulando la perilla del gasómetro.
- x. Realizar un purgue de líneas. Para ello, abrir lenta y cuidadosamente la válvula *GAS IN/OUT VALVE* (MV8) y la válvula de seguridad del puerto *GAS IN/OUT* (MV5), en ese orden, para drenar una alícuota de la muestra (aproximadamente 4 cc). Luego, cerrar la válvula de tres vías (MVa) para aislar la cámara del gasómetro y cerrar las válvulas MV5 y MV8, en ese orden.  
**Nota:** la apertura de la válvula MV5 debe ser de tal forma que el fluido sólo gotee.
- xi. Cambiar el vial por otro nuevo y practicarle vacío. Al finalizar, cerrar la válvula de paso a la bomba de vacío (MVb).

- xii. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada y enviar gas al sistema (conexión tipo cruz, línea, y vial). Esto con el fin de mantener equilibrado el sistema y eliminar la presión negativa.
- xiii. Anotar la lectura inicial de volumen indicado en el panel de control de la celda auxiliar.
- xiv. Desplazar un volumen apropiado de muestra al vial. Para ello, abrir lenta y cuidadosamente la válvula *GAS IN/OUT VALVE* (MV8), y la válvula de seguridad del puerto *GAS IN/OUT* (MV5), en ese orden. Observar la salida de fluido al vial.  
**Nota:** la apertura de la válvula MV5 debe ser de tal forma que el fluido sólo gotee.
- xv. Ajustar este volumen mediante la apertura de la válvula de drenaje (MV5), y al obtener el volumen de referencia deseado, cerrar las válvulas MV5 y MV8.  
**Nota:** el cierre de las válvulas debe ser sin exceso de fuerza para evitar daños en las roscas que las inhabiliten, y en el orden indicado.
- xvi. Medir y anotar el volumen acumulado de gas. Es de hacer notar que para obtener una lectura correcta del volumen de gas, se debe verificar que la presión en el manómetro sea igual a cero, de lo contrario ajustarla manipulando la perilla del gasómetro.
- xvii. Verificar que el volumen de líquido en el vial sea suficiente para realizar los análisis complementarios de densidad, peso molecular, y cromatografía. En caso contrario, drenar el volumen medido de gas hacia la atmosfera ajustando la válvula MVa hacia el puerto de venteo, y subiendo el pistón hasta el tope de la cámara manipulando la perilla; al finalizar ajustar la válvula MVa a la posición de entrada y repetir los pasos del xiv al xvi.
- xviii. Anotar la lectura final del volumen de la celda indicado en el panel de control de la celda auxiliar.
- xix. Abrir la válvula del cilindro recolector de gas (MVc), sumergido en nitrógeno líquido para bajar la temperatura del mismo y provocar el paso del gas, del gasómetro al cilindro por diferencia de presiones. Este proceso se realiza hasta

que se agote el volumen de gas en el gasómetro; esto se puede observar por medio de la lectura del manómetro, el cual tenderá a una lectura negativa. (véase figura 117).

**Nota:** las salpicaduras de nitrógeno líquido producen quemaduras profundas y graves, por lo cual manipular con precaución y emplear guantes aislantes para bajas temperaturas, careta facial y bata.

- xx. Cerrar rápidamente la válvula de tres vías (MVa) para evitar daños en el manómetro.
- xxi. Cerrar la válvula del cilindro recolector de gas (MVc).
- xxii. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de venteo para que no quede tanto tiempo el manómetro en negativo y evitar daños.
- xxiii. Retirar el cilindro y colocar una etiqueta de identificación indicando: (a) nombre del pozo, (b) profundidad, (c) presión, (d) temperatura, y (e) fecha.
- xxiv. Retirar el vial de las agujas y pesarlo, luego se le coloca una etiqueta de identificación indicando: (a) nombre del pozo, (b) profundidad, (c) presión, (d) temperatura, y (e) fecha.
- xxv. Enviar la muestra de gas (cilindro recolector) y la muestra de líquido (vial) al laboratorio de análisis complementarios PVT para estudio composicional.

En la figura 117 se observa la transferencia del gas que se encuentra en el gasómetro hacia el cilindro recolector de gas sumergido en nitrógeno líquido para su posterior análisis cromatográfico.

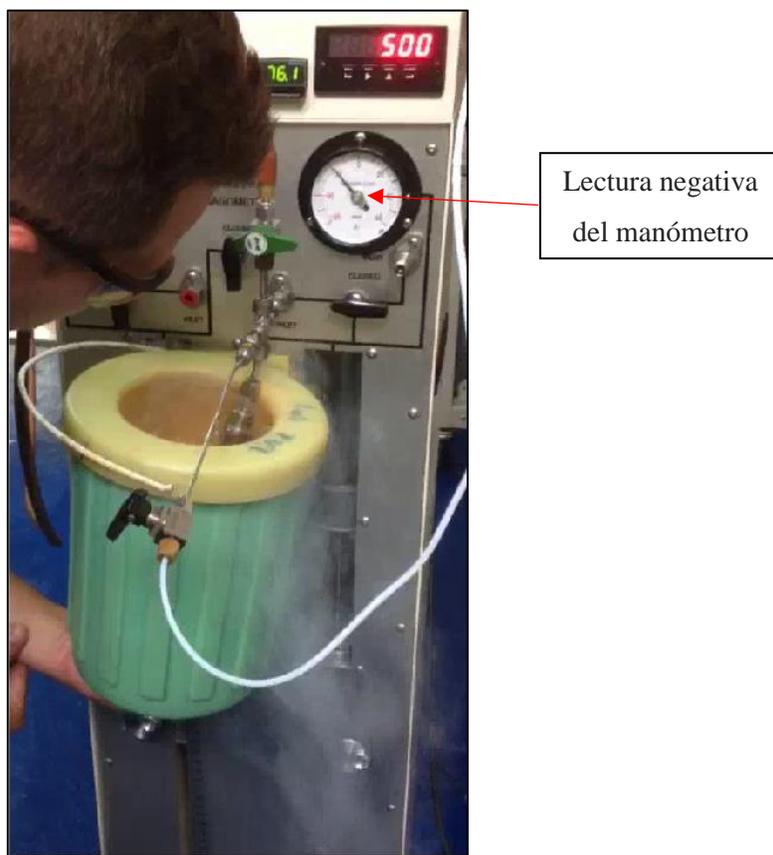


Figura 117. Transferencia del gas del gasómetro al cilindro sumergido en nitrógeno líquido.

En la figura 118 se observa el vial el cual es un recipiente de vidrio utilizado como separador atmosférico, y se conecta a la aguja de salida del fluido, en el puerto *GAS IN/OUT (MV5)* del sistema Chandler PVT 3000.



Figura 118. Viales para la recolección de líquido condensado.

De esta prueba se obtienen muestras de gas y líquido. Las dos fases son caracterizadas individualmente permitiendo obtener el factor volumétrico de formación del gas ( $\beta_g$ ) a presión de carga y presión de rocío, la relación gas líquido (RGL), la gravedad API y densidad del líquido obtenido a condiciones de tanque, peso molecular y composición total del fluido de yacimiento por recombinación matemática.

Sobre las propiedades del fluido gas condensado (RGL, °API,  $\beta_g$ ,  $\rho$ ), para su determinación se utilizaron expresiones matemáticas fundamentadas en los datos experimentales registrados durante el desarrollo de la prueba liberación instantánea. Este proceso de cálculo se explica en detalle a continuación:

La relación gas líquido se obtuvo al dividir el volumen de gas a condiciones base ( $V_{gas \text{ a CB}}$ ) entre el volumen de líquido a condiciones de tanque ( $V_{liq \text{ a CT}}$ ), como se observa en la ecuación 68.

$$RGL = \frac{V_{gas \text{ a CB}} * 5,6145}{V_{liq \text{ a CT}}} \quad \text{Ec. 68}$$

Dónde:

$$V_{liq \text{ a CT}} = \frac{Pm}{\rho_{liq \text{ a CT}}} \text{ (cc).}$$

Dónde:

$Pm$  = Peso de la muestra (gr).

$\rho_{liq \text{ a CT}}$  = Densidad de líquido a condiciones de tanque (gr/cc).

La densidad de líquido a CT se determina mediante la ecuación:

$$\rho_{liq \text{ a CT}} = GE_{60/60} * 0,999015$$

La gravedad específica a 60/60 se determinó mediante la siguiente ecuación, donde los parámetros A, B, C, y D son constantes que se definen como se muestra:

$$GE_{60/60} = A + (B * T) + (C + D * T) * \rho_{liq}$$

Dónde:

$$A = -0,0349422$$

$$B = 0,000582$$

$$C = 1,014858$$

$$D = -0,000248$$

$T$  = Temperatura 60°F

$\rho_{liq}$  = Densidad de líquido (gr/cc).

La densidad de líquido se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{liq} = \frac{\rho_m}{0,99823}$$

Dónde:

$\rho_m$  = Densidad de la muestra medida en el laboratorio (gr/cc).

Luego se calculó el volumen de gas a condiciones base, mediante la ecuación:

$$V_{gas \ a \ CB} = (V_{gas \ liberado} * FC_{gas}) - V_{liq \ a \ CT}$$

Dónde:

$V_{gas \ liberado}$  = Volumen total de gas medido en el gasómetro (cc).

$$FC_{gas}(\text{factor de correccion del gas}) = \frac{(P_{bar}/29,92) * 520}{T_{amb} + 460}$$

La gravedad API a 60/60 se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$^{\circ}API_{60/60} = \frac{141,5}{GE_{60/60} - 131,5}$$

Finalmente se calculó la gravedad API a temperatura ambiente, mediante la siguiente ecuación:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho_{liq} - 131,5}$$

El factor volumétrico de formación del gas a la presión de carga y temperatura de la celda, se determinaron como se muestra en la ecuación 69:

$$\beta g = \frac{VMPCTC}{V_{gas\ a\ CB}} \quad \text{Ec. 69}$$

El volumen de muestra a presión de carga y temperatura de la celda (*VMPCTC*) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$VMPCTC(cc) = VMDTA * FC_{vol\ muestra}$$

Dónde:

*VMDTA* = Volumen de muestra a T ambiente (cc).

*FC<sub>vol muestra</sub>* = Factor de corrección del volumen de muestra (adim).

Dónde:

*VMDTA* = Lectura final (cc) – lectura inicial (cc).

*FC<sub>vol muestra</sub>* = 1.

El factor volumétrico de formación del gas a la presión de rocío y temperatura de la celda, se determinó como se muestra en la ecuación 70:

$$\beta g = \frac{VMPRTC}{V_{gas\ a\ CB}} \quad \text{Ec. 70}$$

El volumen de muestra a presión de rocío y temperatura de la celda (*VMPRTC*) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VMPRTC(cc) = \frac{VMPCTC}{V_{rel\ a\ PC}}$$

Donde el volumen relativo a la presión de carga (*V<sub>rel a PC</sub>*) es adimensional y se obtiene a partir de la prueba de expansión a composición constante (CCE).

Por otra parte, la densidad de la muestra a la presión de carga y temperatura de la celda se determinó como se muestra en la ecuación 71:

$$\rho m = \frac{Pt}{VMPCTC} \quad \text{Ec. 71}$$

Dónde:

*Pt* = Peso total de la muestra (gr).

El peso total de la muestra se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$Pt = P_{gas} + P_{liq}$$

Dónde:

$P_{gas}$  = Peso del gas (gr).

$P_{liq}$  = Peso del líquido (gr).

El peso del gas se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_{gas} = \frac{V_{gas \text{ a } CB} * PM_{gas}}{23690}$$

Dónde:

$$PM_{gas} = GE_{gas \text{ a } 60^{\circ}F} * 28,966$$

El peso de líquido se determina mediante la siguiente ecuación:

$P_{liq}$  = Peso del vial con líquido (gr) – Peso del vial vacío (gr).

Finalmente, la densidad de la muestra a la presión de rocío y temperatura de la celda se determinó como se indica en la ecuación 72:

$$\rho_m = \frac{P_t}{V_{MPRTC}} \quad \text{Ec. 72}$$

#### 5.4.1.1 Análisis composicional

Las muestras de gas y líquido fueron enviadas al laboratorio de análisis complementarios PVT y Departamento de Química Analítica de PDVSA-Intevep con motivo de realizar el análisis composicional requerido (cromatografía de gas, PNA, peso molecular y densidad). Cabe aclarar que actualmente en PDVSA-Intevep se determina la composición de las muestras de líquido mediante el análisis PNA extendido, desde C<sub>1</sub> hasta C<sub>36</sub>, no siendo requerido para tal fin los análisis de destilación simulada a baja temperatura. Por su parte la muestra de gas fue analizada mediante cromatografía de gas (GC) desde C<sub>1</sub> a C<sub>6</sub><sup>+</sup>.

##### a) Cromatografía de gases (GC)

Equipos utilizados:

- Cromatógrafo de gases HP-6890.  
Equipado con un inyector capilar, dos válvulas de 6 y una de 10 vías, resistentes a temperaturas altas (375°C), columnas empacadas, un detector de conductividad térmica (TCD) y un detector de ionización a la llama (FID).
- Mezcla de hidrocarburos gaseosos Messer, para calibración del cromatógrafo.
- Sistema de adquisición de datos.
- Sistema de inyección de muestra.  
Conformado por una bomba de vacío, válvulas de cierre rápido, válvula micrométrica y un manómetro de alta presión.
- Mantas de calentamiento y termocuplas.

La muestra de gas proveniente de la liberación instantánea fue analizada en un cromatógrafo de gases (véase figura 119), utilizando hidrógeno como gas de arrastre y detectores FID y TCD.

El detector FID se basa en la quema de los compuestos y el registro de los iones provenientes de la llama despedida, por eso solo es utilizada para hidrocarburos, mientras que el principio de funcionamiento del detector TCD se fundamenta en la diferencia de conductividad de los compuestos con el gas de arrastre por lo que se

puede identificar cualquier sustancia. Como resultado de esta prueba se determinó la composición molar del gas desde  $C_1$  hasta  $C_6^+$ , además de componentes como nitrógeno ( $N_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Este análisis sigue la norma ASTM D 1945-02.



Figura 119. Cromatógrafo de gases HP 6890.

b) Análisis PNA

La muestra de líquido fue sometida a un análisis PNA, obteniéndose la composición desde  $C_1$  hasta  $C_{36}$ . Este estudio se desarrolló en un cromatógrafo adecuado para el análisis de fracciones líquidas (véase figura 120), conformado por un arreglo de columnas y válvulas a través de las cuales se hace pasar la muestra de hidrocarburos. El análisis sigue la norma ASTM D 6730-01.



Figura 120. Cromatógrafo de líquido para análisis PNA.

c) Peso molecular del líquido (Ml)

El peso molecular promedio del líquido se determinó por el método de depresión del punto de congelamiento, el cual es el adecuado para caracterizar crudos medianos y livianos.

Los equipos y materiales utilizados para determinar el peso molecular son los siguientes:

- Crioscopio Cryette modelo WR 5009.
- Balanza analítica.
- Viales.
- Benceno.
- Pipeta.

El equipo Cryette WR 5009 para mediciones del punto de congelamiento en muestras de crudo se muestra en la figura 121.



Figura 121. Crioscopio Cryette de rango amplio WR 5009.

El procedimiento experimental es el siguiente:

Encendido:

- i. Encender el equipo, activando el interruptor *ON/OFF*.

- ii. Verificar el nivel óptimo del líquido del baño. Para ello, tomar un vial y sumergirlo dentro de la celda hasta que mueva el resorte, se debe verificar que moja el vial hasta la marca de 2,5 cc.
- iii. Colocar el interruptor operar en la posición “*bath temp*” y levantar el cabezal del equipo manipulando la manija. Esperar entre 45 minutos y 1 hora hasta que la temperatura del baño indique entre  $-2^{\circ}$  y  $-3^{\circ}$  (se recomienda  $-2,5^{\circ}$ ), con una variación de  $\pm 2,1^{\circ}$ .

Calibración del instrumento:

Antes de usar el equipo, se debe calibrar para el rango de interés. El Cryette WR es calibrado para el rango de interés corriendo una muestra de benceno en el equipo. En el caso de usar benceno como solvente, se debe ajustar la perilla “control rango” en la posición 6. El procedimiento es como sigue:

- iv. Agregar 2,5 ml de benceno en un vial e introducirlo en el orificio del refrigerador, simultáneamente bajar el cabezal manipulando la manija.
- v. Colocar el interruptor *auto seed* en la posición “*special*”. Se observará en la pantalla que el valor aumenta hasta un poco más de 1000, luego realiza un sonido y baja hasta llegar a “0”. La luz de lectura en la parte inferior derecha de la pantalla debe mostrar “*read*”.
  - Verificar primero que el cabezal se encuentre limpio.
  - Si no llega a cero y la diferencia con respecto al cero es  $\pm 10$ : Colocar el interruptor *auto seed* en la posición “*manual*” y ajustar con la perilla “solvente cero”.
  - Si la diferencia es mayor a  $\pm 10$ : Ajustar con un destornillador en el orificio “control rango extendido”.
- vi. Bajar el “interruptor ajustar” a la posición “*seed*” para guardar la calibración.
- vii. Colocar el interruptor *auto seed* en modo “*auto seed*”. Levantar el cabezal, sacar la muestra y colocar el interruptor operar en posición “*bath temp*”.

Preparación de la muestra:

- viii. Cuando no se tenga un estimado del peso molecular de la muestra, experimentalmente se sabe que utilizando 2,9 gr de muestra con 3,2 gr de benceno el equipo ofrece una lectura cuyo % de error ronda de 10 a 15% del valor real de PM. Si se tiene un estimado del valor real, saltar este paso.
- ix. Una vez que se tenga un estimado del PM se puede utilizar la relación de pesos entre muestra y benceno que se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Relación de pesos entre la masa de muestra y benceno.

PM estimado	Relación de pesos ( $m_b/m_m$ )
300	17,1
400	12,8
500	10,2
600	8,5
700	7,3
800	6,4
900	5,7
1000	5,1

Medición de peso molecular:

- x. Pesar un vial con su respectiva tapa de goma, anotar su valor y posteriormente tarar su peso en gr en la balanza analítica.
- xi. Usar una pipeta para introducir dentro del vial y medir la cantidad de muestra de crudo a utilizar, colocando como única restricción un límite inferior de 2,7 gr de muestra (este límite debido a que el equipo para la medición de peso molecular necesita 2,5 ml de solución).
- xii. Tarar nuevamente el peso de la muestra + (vial y goma), una vez conocido el peso de la muestra y Buscar en tablas pre determinadas el peso molecular del benceno que se debe utilizar en la solución a medir.

**Nota:** Para crudos medianos y livianos se recomienda usar una relación de pesos entre 20 y 25.

- xiii. Retirar la tapa del vial y colocarla sobre la balanza. Luego, utilizar una pipeta, medir la cantidad de benceno requerida con la mayor precisión en el menor tiempo posible. Cuando se alcance el peso requerido se procede a tapar cuidadosamente el vial con la tapa de goma y repetir la medición del peso total para verificar que no haya ocurrido evaporación del benceno.
- xiv. Agitar manualmente el vial con el benceno y la muestra hasta diluir todo el crudo con en el benceno; esto con el fin de homogenizar la solución.
- xv. Colocar el interruptor operar en la posición “*bath temp*” y levantar el cabezal del equipo manipulando la manija.
- xvi. Agregar 2,5 ml de solución problema en un vial e introducirlo en el orificio del refrigerador, simultáneamente bajar el cabezal manipulando la manija.
- xvii. Colocar el interruptor operar en la posición “*operate*” y esperar la lectura arrojada por el equipo, la cual será válida para el rango de (900 a 1100) según indicaciones del fabricante. La luz de lectura en la parte inferior derecha de la pantalla debe mostrar “*read*”.
- xviii. Una vez obtenida la lectura, utilizar la ecuación 73 para calcular el peso molecular del líquido.

$$Ml = \frac{m_m \times 1000 \times K_f}{m_b \times \Delta T} \quad \text{Ec. 73}$$

Dónde:

$m_m$  = Masa de soluto, gr

$m_b$  = Masa de solvente, gr

$K_f$  = Constante de depresión del punto de congelamiento, para benceno: 5,12 °C/mol

$\Delta T$  = Lectura, °C

d) Densidad del líquido ( $\rho_l$ )

La densidad del líquido se determinó utilizando un densímetro digital, y de acuerdo a lo establecido en la norma estándar ASTM D 4052-95.

El analizador digital empleado (modelo DMA 4500M), consta de un tubo de muestra oscilante en forma de U, un sistema para excitación electrónica, conteo de frecuencia, y pantalla (véase figura 122).

Equipos utilizados:

- Densímetro digital DMA 4500M.
- Inyectadoras, al menos 2 mL en volumen con una punta o adaptador que encaje con la abertura del tubo oscilante.
- Termómetro, calibrado y graduado a 0,1 °C.



Figura 122. Densímetro digital DMA 4500M.

El procedimiento llevado a cabo para obtener la densidad es el siguiente:

- i. Introducir una pequeña cantidad (aproximadamente 0,7 mL) de muestra en el tubo de muestra limpio, y seco del instrumento usando una jeringa adecuada.
- ii. La muestra también puede ser introducida usando un sifón. Conectar el tubo capilar de fluorocarbono en el puerto de entrada inferior del tubo de muestra. Sumergir el otro extremo del capilar en la muestra y aplicar succión hacia el puerto de entrada superior usando una jeringa o línea de vacío hasta que el tubo de muestra se llene adecuadamente.
- iii. Encender la luz de iluminación y examinar el tubo de muestra cuidadosamente. Asegurarse que no haya burbujas atrapadas en el tubo, y que

- sea llenado un poco más allá del punto de suspensión en el lado derecho. La muestra debe estar homogénea y libre de incluso las burbujas más pequeñas.
- iv. Apagar la luz de iluminación inmediatamente después de introducir la muestra, ya que el calor generado puede afectar la temperatura de medición.
  - v. Después que el instrumento muestre en pantalla una lectura estable de cuatro cifras significativas para la densidad y cinco para los valores T, indicando que la temperatura de equilibrio ha sido alcanzada, registrar la densidad o valor T.
  - vi. El valor registrado es el resultado final, expresado como densidad en g/mL,  $\text{kg/m}^3$  o como densidad relativa.

#### 5.4.2. *Proceso de expansión a composición constante (CCE).*

Esta prueba involucra la medición de las relaciones de presión-volumen de la muestra de fluido a la temperatura del yacimiento con la celda de gas condensado. La celda dispone de un instrumento (boroscopio) que permite la observación del proceso de condensación producto de los cambios en presión. La prueba está diseñada para determinar visualmente el punto de rocío a la temperatura del yacimiento y el volumen relativo total (relativo al volumen en el punto de rocío) del fluido como una función de la presión.

Los equipos utilizados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT libre de mercurio modelo 3000.
- Bomba Quizix.

En la figura 123, se presenta un diagrama del montaje experimental para llevar a cabo este proceso.

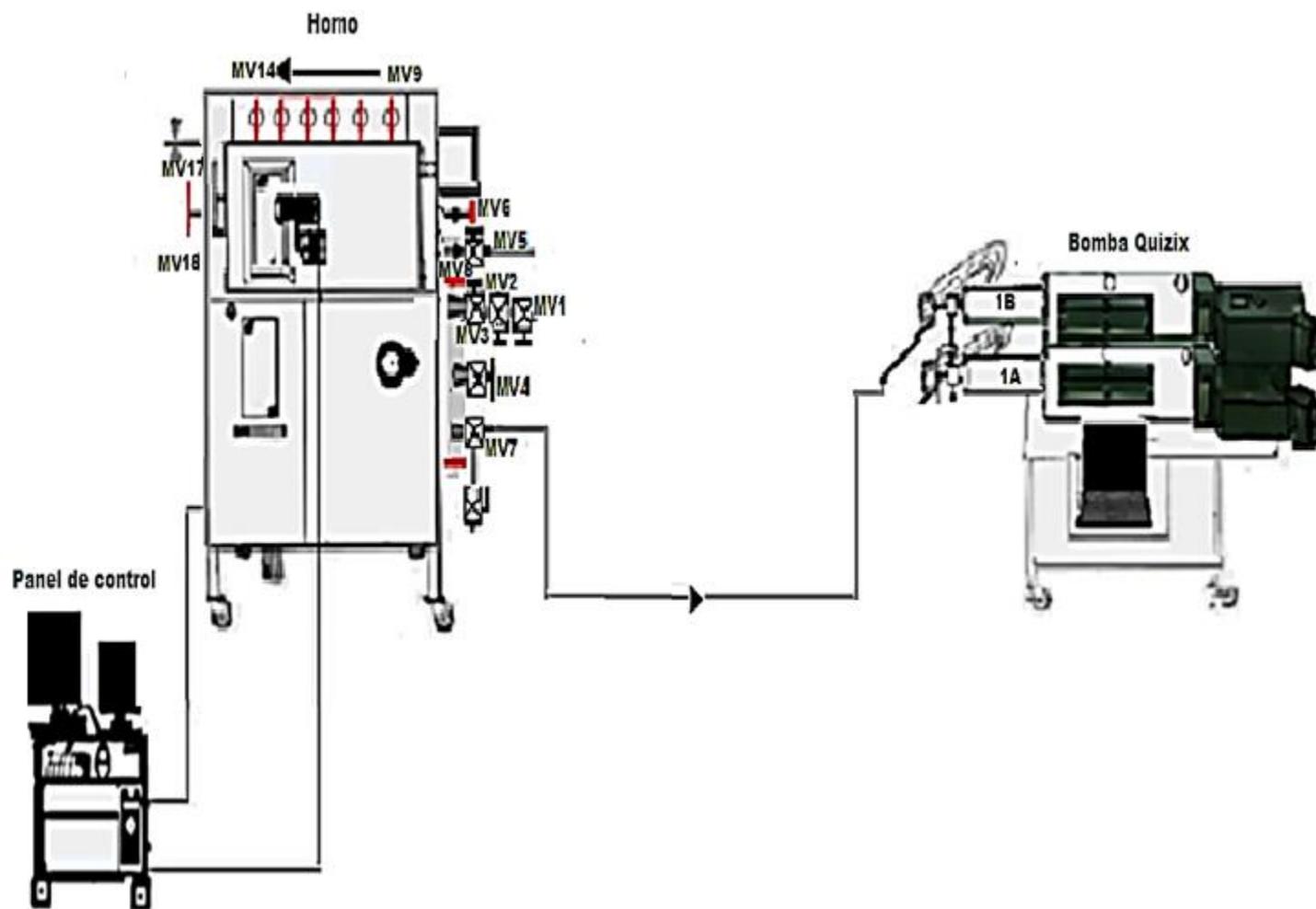


Figura 123. Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba CCE.

Las instrucciones de trabajo para realizar este experimento son las siguientes:

- i. Verificar que la temperatura indicada en la celda auxiliar sea la especificada (dato). En caso de que no lo sea introducirlo en el panel de control de temperatura.
- ii. Chequear que el agitador magnético esté encendido. En caso contrario, activarlo en el panel de control de la celda auxiliar.
- iii. Fijar el sistema a presión constante, superior a la presión de rocío. Para ello, en la ventana principal del programa *PumpWorks*, ingresar un *set point* de presión adecuado y hacer clic en el botón *Start*.

**Nota:** es importante estimar cuantos pasos se llevarán a cabo por encima del punto de rocío a fin de establecer los intervalos de presión.

**Nota:** es importante considerar el diferencial de presión existente entre la celda auxiliar y la bomba. Se debe introducir en la bomba una presión menor al *set point* deseado para la celda auxiliar. De aquí en adelante se asumirá que este diferencial es tenido en cuenta por el usuario.

- iv. Esperar hasta que la muestra se estabilice, es decir, que la presión y el volumen que se muestran en pantalla no varíen. Observar mediante el boroscopio la fase del fluido, ésta debe estar monofásica (gaseosa).
- v. Registrar la presión y el volumen en el cuaderno de laboratorio.
- vi. Fijar una nueva presión menor que la anterior (véase paso iii).
- vii. Esperar el equilibrio entre la presión y el volumen. Registrar ambos datos en el cuaderno de laboratorio. Además, haciendo uso del boroscopio, medir y anotar el volumen de líquido retrogrado acumulado en la celda (en el caso:  $P < P_r$ ). El boroscopio es operado manualmente durante el curso de la prueba; para su operación se recomienda seguir las siguientes instrucciones:
  - Verificar que la cámara esté encendida y que esté siendo visualizada en el monitor de video del panel de control.
  - Encender la luz para el boroscopio, activando el interruptor *Light* en el panel de control de la celda auxiliar (véase figura 45).

- Usando la manivela de posicionamiento, localizada en la parte frontal del horno, desplazar el boroscopio hasta que el corte de video esté posicionado en el punto cero del volumen de líquido. Este está definido como el tope del sello o anillo de detención de metal (encima del sello) en el fondo de la celda de gas condensado.
  - Presionar el botón *Zero* en el panel de control de la celda auxiliar (véase figura 45) para resetear la posición y ajustar el volumen de líquido a 0,00 cc.
  - A medida que el líquido se forme, medir el nivel de líquido girando la manivela para mover el corte de video del boroscopio al nuevo nivel de líquido. Registrar el nivel en el programa presionando el botón *Update* (véase figura 45). El botón *Update* debe ser presionado cada vez que la lectura del boroscopio es cambiada para medir y mostrar en pantalla el nuevo volumen de líquido.
  - Medir el nivel de líquido (lectura del boroscopio) y el volumen de líquido en cada etapa durante el experimento. Como se mencionó, el botón *Update* debe ser presionado cada vez que la lectura del boroscopio es cambiada para medir y mostrar en pantalla el nuevo volumen de líquido.
- viii. Repetir los pasos vi y vii hasta obtener de seis a ocho puntos por encima de la presión de rocío.
- ix. Utilizando el boroscopio, observar atentamente el interior de la celda auxiliar a fin de contemplar el punto de rocío (una fase gaseosa con apariencia de neblina, la cual desaparece al poco tiempo cuando las gotas de líquido se segregan hacia la parte inferior de la celda). Registrar rápidamente la presión y el volumen observados en este punto.
- x. Configurar intervalos de presión más pequeños, aproximadamente ocho o más puntos a partir de la visualización del punto de rocío.
- xi. Repetir los pasos del v al vii hasta alcanzar una disminución en el volumen de líquido retrogrado acumulado.

5.4.3. *Agotamiento a volumen constante (CVD).*

La prueba está diseñada para simular el comportamiento de agotamiento del yacimiento y la variación composicional del gas condensado producido. El experimento está basado en la suposición que el volumen del yacimiento es constante. Además, se asume que el líquido retrogrado generado no alcanza movilidad en el medio poroso. En general, mientras más etapas de presión se consideren, más cercano estará el experimento a la realidad.

Los equipos y sustancias químicas usados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT libre de mercurio modelo 3000.
- Gasómetro de doble celda. Modelo 2331d.
- Bomba Quizix.
- Cilindro recolector de gas para análisis.
- Líneas y conexiones.
- Vial.
- Balanza analítica.
- Bomba de vacío.
- Helio.
- Nitrógeno líquido.
- Compresor.

La figura 124 que se muestra a continuación presenta el diagrama de los equipos usados en este procedimiento.

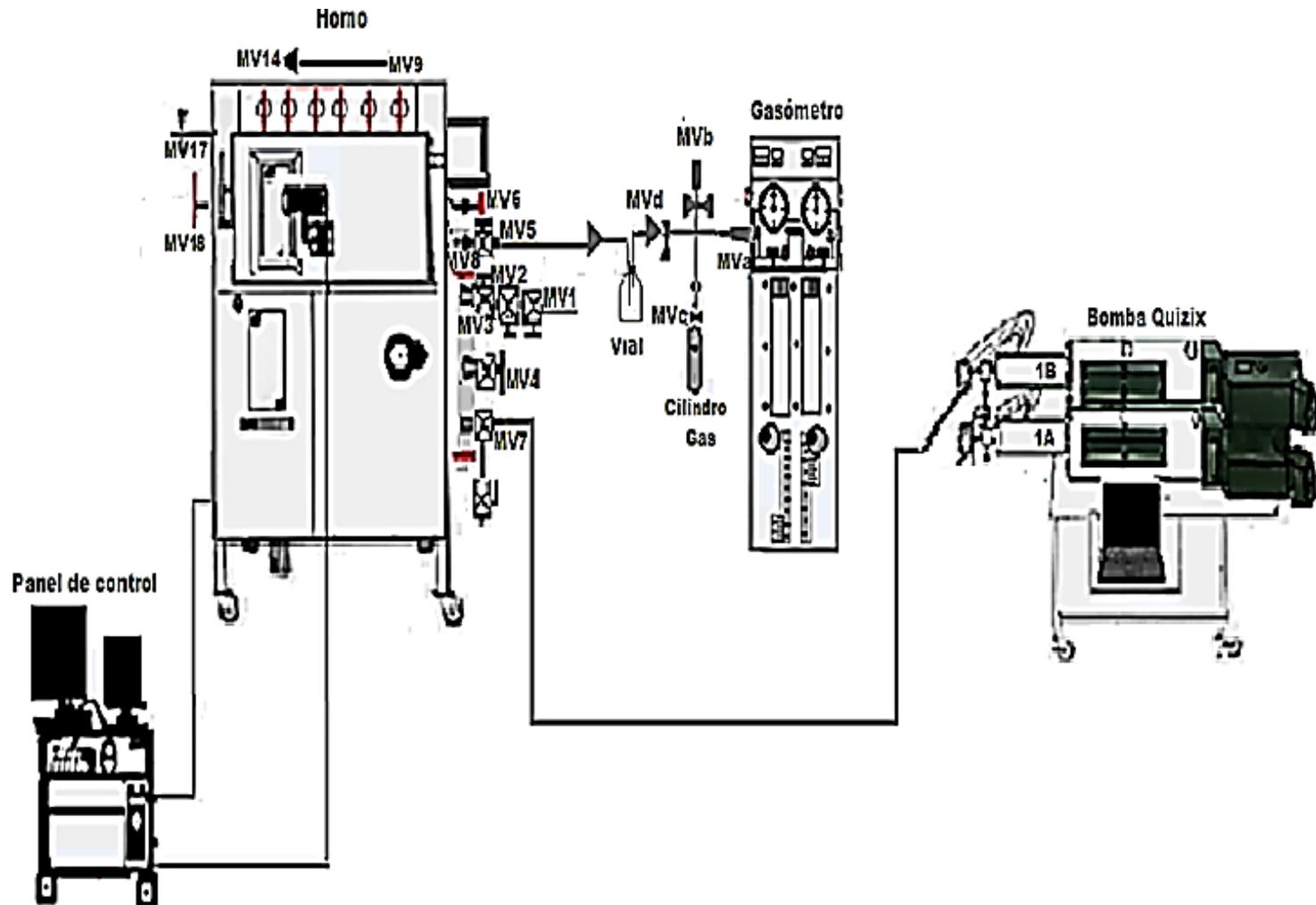


Figura 124. Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba CVD.

Las instrucciones de trabajo para realizar este experimento son las siguientes:

- i. Chequear que la temperatura indicada en el panel de control de la celda auxiliar sea la especificada. En caso contrario, ajustar el *set point* de temperatura en el panel de control de temperatura en la pantalla principal.
- ii. Chequear que el agitador magnético de la celda auxiliar esté activado. En caso contrario activarlo en el panel de control de la celda auxiliar.
- iii. Presurizar la celda a una presión por encima de la presión de rocío para restaurar la muestra a condiciones monofásicas. Para ello, en la ventana principal del programa *PumpWorks* ingresar un *set point* de presión adecuado y presionar el botón *Start*.

**Nota:** es importante considerar el diferencial de presión existente entre la celda auxiliar y la bomba. Se debe introducir en la bomba una presión menor al *set point* deseado para la celda auxiliar. De aquí en adelante se asumirá que este diferencial es tomado en cuenta por el usuario.

- iv. Esperar hasta que la muestra se estabilice, es decir, que la presión y el volumen que se muestran en pantalla no varíen. Observar el interior de la celda utilizando boroscopio, la fase debe estar gaseosa. Además, verificar que el volumen registrado en la prueba CCE para ésta etapa de presión coincida con el volumen indicado en el panel de control de la celda auxiliar.
- v. Verificar que la valvula Ruska tipo L esté conectada al puerto de salida *GAS IN/OUT (MV5)*.
- vi. Pesar un vial tapado, el cual es utilizado como un separador atmosférico para recolectar la muestra de gas condensado que se genere en la etapa, y garantizar que no hay arrastre de líquido. Seguidamente conectarlo a *MV5*.
- vii. Conectar desde el vial una línea flexible hasta la conexión tipo cruz que da acceso al gasómetro y desde la parte inferior de la conexión tipo cruz conectar un cilindro recolector de gas, el cual debe estar limpio y probado a fugas.

- viii. Realizar vacío al sistema conectado al equipo PVT (vial, cilindro recolector de gas, conexión tipo cruz, y línea) aproximadamente por 20 minutos (véase procedimiento técnico: Liberación *flash*).
- ix. Curar las cámaras del gasómetro con helio (véase procedimiento técnico: Liberación *flash*).
- x. Abrir la válvula de tres vías (MVA) hacia el puerto de entrada del gasómetro y desplazar el helio al sistema (conexión tipo cruz, línea, y vial). Expulsar el helio remanente en las cámaras del gasómetro (véase procedimiento técnico: Liberación *flash*), y ajustar la presión interna a la presión atmosférica manipulando la perilla del gasómetro.
- xi. Definir el número de etapas o intervalos de presión a los que se va a realizar el agotamiento a volumen constante.  
**Nota:** se requieren aproximadamente de ocho a diez etapas por debajo del punto de rocío, siendo la última a condiciones atmosféricas.
- xii. Fijar el sistema a una presión constante igual a la presión de rocío. Para ello, en la ventana principal del programa *PumpWorks* ingresar un *set point* de presión adecuado (Pr) y presionar el botón *Start*.
- xiii. Esperar hasta que la muestra se estabilice, es decir, que la presión y el volumen de la celda no varíen. Registrar la presión y el **volumen de referencia** en el cuaderno de laboratorio.
- xiv. Fijar una nueva presión menor a la presión de rocío. Agitar la muestra por un periodo de media hora. Detener la agitación y esperar por un periodo de media hora hasta que la muestra en reposo se estabilice. Observar el interior de la celda utilizando el boroscopio, la fase del fluido debe estar bifásica (gas y líquido condensado).
- xv. Anotar en el cuaderno de laboratorio la presión, y el volumen en la celda (volumen de gas + volumen de líquido retrogrado). Además, anotar la lectura de volumen de líquido retrogrado, determinado mediante la manipulación del boroscopio (véase procedimiento técnico: Proceso de expansión a composición constante).

- xvi. Desplazar el volumen de gas suficiente al vial a presión constante para alcanzar el volumen de referencia registrado en el paso xiii. Para ello, abrir lenta y cuidadosamente las válvulas MV8 y MV5, en ese orden. Observar la salida de fluido en el vial.
- xvii. Cerrar las válvulas MV5 y MV8 en ese orden, inmediatamente después de haber retirado el gas de esa etapa (cuando en el panel de control de la celda auxiliar se muestre un volumen igual al volumen de referencia). En este punto, anotar nuevamente el volumen de líquido retrogrado, en caso de presentar ligeras variaciones.
- xviii. Medir y anotar el volumen acumulado de gas en el gasómetro. Es de hacer notar que para obtener una lectura correcta del volumen de gas, se debe verificar que la presión en el manómetro sea igual a cero, de lo contrario ajustarla manipulando la perilla del gasómetro.
- xix. Abrir la válvula del cilindro recolector de gas (MVc), sumergido en nitrógeno líquido para bajar la temperatura del mismo y provocar el paso del gas, del gasómetro al cilindro por diferencia de presiones. Este proceso se realiza hasta que se agote el volumen de gas en el gasómetro; esto se puede observar por medio de la lectura del manómetro, el cual tenderá a una lectura negativa.  
**Nota:** las salpicaduras de nitrógeno líquido producen quemaduras profundas y graves, por lo cual manipular con precaución y emplear guantes aislantes para bajas temperaturas, careta facial y bata.
- xx. Cerrar rápidamente la válvula de tres vías (MVa) para evitar daños en el manómetro.
- xxi. Cerrar la válvula del cilindro recolector de gas (MVc).
- xxii. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de venteo para que no quede tanto tiempo el manómetro en lectura negativa y evitar daños.
- xxiii. Retirar el cilindro y colocar una etiqueta de identificación indicando: (a) nombre del pozo, (b) profundidad, (c) presión, (d) temperatura, y (e) fecha.

- xxiv. Colocar otro cilindro y practicarle vacío al sistema (vial, conexión tipo cruz, cilindro recolector de gas, y línea), (véase procedimiento técnico: Liberación *flash*).
- xxv. Ir al paso siguiente si se desea efectuar una nueva etapa, si esta etapa corresponde a la presión de abandono, ir al último paso.
- xxvi. Iniciar una nueva etapa de agotamiento. Disminuir la presión de acuerdo a la nueva etapa y repetir desde el paso xiv.
- xxvii. Realizar un *flash* final en una sola etapa (véase procedimiento técnico: Liberación *flash*).

En la figura 125 se puede apreciar el proceso de manipulación de las válvulas de seguridad de altas presiones pertinentes para drenar un volumen determinado de muestra desde la celda de gas condensado a un vial que se encuentra a condiciones atmosféricas de presión y temperatura (*flash* final).



Figura 125. Desplazamiento de volumen de muestra al vial mediante apertura de válvula MV5.

### 5.5. Apagado y desmontaje del sistema

Este procedimiento es llevado a cabo una vez concluidas todas las pruebas PVT programadas en el equipo. El sistema PVT 3000 tiene un procedimiento de apagado

recomendado por el fabricante *Chandler Engineering*, cuyo propósito es asegurar que todos los subcomponentes sean desconectados correctamente y todos los parámetros necesarios sean almacenados en los archivos del sistema. Si el sistema es apagado de una forma diferente a lo aquí expuesto, algunos parámetros podrían no ser salvados.

### Apagado

- i. Detener los agitadores (magnético y acústico) de la celda auxiliar.
- ii. Detener el registro de datos (seleccionar *File... Log Data... Manual* o *Automatic*) en el caso de haber sido habilitados.
- iii. Apagar los calentadores presionando el botón verde *ON* debajo de la ventana *set point* (los calentadores están apagados cuando el botón cambia a rojo *OFF*) y/o apagar el interruptor *OVEN FAN AND HEATERS* en el costado derecho inferior del instrumento.
- iv. Salir del programa usando el comando *File... Exit*.
- v. Esperar hasta que el programa PVT3000 se cierre completamente, luego desconectar la energía al instrumento con el interruptor *MAIN POWER ON/OFF* localizado en el costado derecho inferior del instrumento.

**Nota:** si el instrumento es apagado primero (antes del programa o computadora), y el suministro de energía al programa es interrumpido, o si la computadora se bloquea, el programa perderá la posición (volumen) de la celda bomba. En este caso, una advertencia aparecerá en pantalla cuando el programa sea re-iniciado, recordándole al operador que debe llevar la celda bomba a la posición *Home* para re-establecer su posición al volumen máximo de la celda bomba, previamente conocido y calibrado.

- vi. Desconectar el equipo de la red eléctrica.

En la figura 126 se ilustra un resumen de los pasos a seguir para el apagado seguro del equipo.

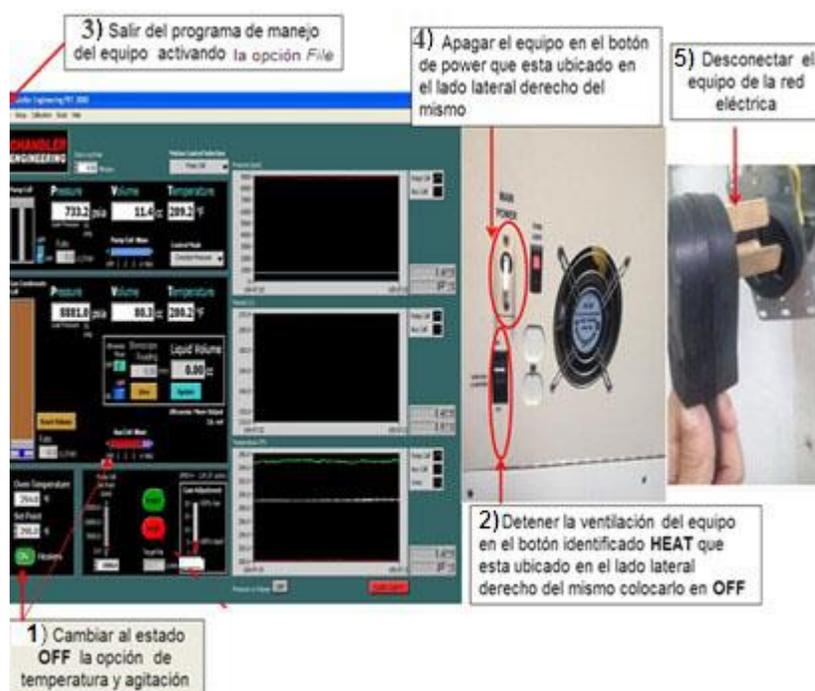


Figura 126. Apagado seguro del sistema Chandler PVT 3000.

### Desmontaje

- vii. Cerrar todas las válvulas, desde la más cercana hasta la más lejana a la celda auxiliar (MV6, MV8, MV5, MV7, MV9, MV3, MV2, y MV1).
  - viii. Cerrar la válvula superior del cilindro portamuestra (MV15).
  - ix. Desconectar la línea entre el cilindro y horno (MV15-MV1) y hacerle vacío.
  - x. Disminuir progresivamente la presión de los cilindros 1A y 1B de la bomba Quizix hasta alcanzar un *set point* de presión de 50 lpc.
- Nota:** las válvulas de entrega de ambos cilindros deben estar abiertas, y sus válvulas de carga cerradas.
- xi. Cerrar la válvula inferior del cilindro portamuestra (MV16).
  - xii. Desconectar la línea entre el cilindro y la bomba 1A y practicarle vacío.
  - xiii. Colocar los respectivos tapones de seguridad en los puertos de las válvulas MV15 y MV16 del cilindro portamuestra.
  - xiv. Ubicar el cilindro portamuestra en un lugar apropiado dispuesto en el laboratorio para su resguardo.

### 5.6. Cálculo de la composición total de la muestra

Para determinar la composición total del fluido de yacimiento se utilizaron los datos de la liberación instantánea, y los resultados de los análisis realizados a las muestras de líquido (PNA, MI,  $\rho_l$ ) y gas (composición hasta  $C_6^+$ ) recolectadas del *flash*, los cuales fueron procesados en la herramienta computacional *Microsoft Excel*.

Los datos a utilizar son los siguientes:

- Peso molecular del gas
- Gravedad específica del gas
- Relación gas-líquido
- Peso molecular del líquido
- Gravedad API del líquido
- Densidad del líquido a 60 °F
- Gravedad específica del líquido a 60 °F
- Composición del gas
- Datos del PNA

En cuanto al procesamiento de los datos, se presenta a continuación una descripción de las ecuaciones y pasos de cálculo ejecutados en *Microsoft Excel*:

#### 5.6.1. Cálculo de la composición del gas.

El análisis de la muestra de gas por cromatografía genera como resultado la composición del gas desde  $C_1$  hasta  $C_{6+}$ . Estos datos composicionales fueron usados para determinar el peso molecular y la gravedad específica del gas (véase figura 127).

Componentes	Composición cromatográfica	Normalización	Densidad	Mi	G.E	Yi×Mi
NITRÓGENO	1.744	1.746	0.967	28.01	0.01689	0.48914
METANO	55.537	55.610	0.554	16.04	0.30802	8.92143
CO2	16.290	16.311	1.519	44.01	0.24777	7.17857
ETANO	11.352	11.367	1.038	30.07	0.11799	3.41808
PROPANO	7.171	7.180	1.523	44.10	0.10936	3.16631
I-BUTANO	1.226	1.227	2.007	58.12	0.02464	0.71345
N-BUTANO	2.395	2.398	2.007	58.12	0.04813	1.39399
I-PENTANO	0.691	0.692	2.491	72.15	0.01723	0.49904
N-PENTANO	0.742	0.742	2.491	72.15	0.01850	0.53571
HEXANOS	2.722	2.726	2.975	86.18	0.08110	2.34896
HEPTANOS	0.000	0.000	3.460	100.20	0.00000	0.00000
OCTANOS	0.000	0.000	3.944	114.23	0.00000	0.00000
NONANOS	0.000	0.000	4.047	128.26	0.00000	0.00000
DECANOS	0.000	0.000	4.913	142.29	0.00000	0.00000
UNDECANOS	0.000	0.000	5.397	156.32	0.00000	0.00000
	99.87	100.000			<b>0.990</b>	<b>28.66</b>

Figura 127. Hoja de cálculo de las propiedades del gas a partir de los datos de composición.

Para determinar las propiedades se realiza la siguiente serie de cálculos:

- Peso molecular del gas:

$$Mg[gr/mol] = \sum YiNorm * Mi \quad \text{Ec. 74}$$

- Gravedad específica del gas:

$$GEg[adim] = \sum G.Ei \quad \text{Ec. 75}$$

Dónde:

$$GEi = YiNorm * \rho_i \quad \text{Ec. 76}$$

La fracción molar normalizada ( $YiNor$ ) es obtenida a través de la siguiente expresión:

$$YiNorm[adim] = \frac{Yi}{\sum Yi} \quad \text{Ec. 77}$$

### 5.6.2. Cálculo de la composición del líquido.

Del ensayo experimental realizado sobre la muestra de líquido se obtiene la composición de Parafinas, Naftenos y Aromáticos (PNA) hasta C<sub>36</sub>, peso molecular

(Ml), y densidad ( $\rho_l$ ). El procedimiento a ejecutar para determinar la composición del líquido es el siguiente:

- a) Construir una tabla (véase figura 128) donde se ingresa la composición del líquido en porcentaje en peso hasta el C<sub>19</sub>, composición del gas en porcentaje molar hasta el C<sub>6+</sub>, y peso molecular y gravedad específica de cada componente.
- b) Para cada componente del líquido se calcula la fracción másica y fracción molar, como se indica a continuación.

- Fracción másica del líquido:

$$f_i[adim] = \frac{(\%Peso)_i}{100} \quad \text{Ec. 78}$$

- Fracción molar del líquido:

$$X_i[adim] = \frac{f_i}{M_i} * M_l \quad \text{Ec. 79}$$

- c) Se caracteriza la fracción pesada C<sub>19</sub><sup>-</sup> como se indica a continuación.

- Gravedad específica del C<sub>19</sub><sup>-</sup>:

$$GE[adim] = \frac{\frac{\sum(\%Peso)_i}{100}}{\sum \frac{f_i}{GE_i}} \quad \text{Ec. 80}$$

- Peso molecular del C<sub>19</sub><sup>-</sup>:

$$M[gr/mol] = \frac{\frac{\sum(\%Peso)_i}{100}}{\sum \frac{f_i}{M_i}} \quad \text{Ec. 81}$$

- d) Se caracteriza la fracción pesada C<sub>20</sub><sup>+</sup> como se indica a continuación.

- Gravedad específica del C<sub>20</sub><sup>+</sup>:

$$GE[adim] = \frac{100 - \sum(\%Peso)i}{\frac{100}{GEI @ 60/60} - \frac{\sum(\%Peso)i}{GE(C19)}} \quad \text{Ec. 82}$$

- Peso molecular del  $C_{20}^+$ :

$$M[gr/mol] = \frac{\frac{100 - \sum(\%Peso)i}{100}}{\frac{1}{Ml} - \frac{\sum(\%Peso)i/100}{M(C19)}} \quad \text{Ec. 83}$$

- Porcentaje en peso del  $C_{20}^+$ :

$$\%Peso = 100 - \sum(\%Peso)i \quad \text{Ec. 84}$$

- Fracción másica del  $C_{20}^+$ :

$$f[adim] = \frac{100 - \sum(\%Peso)i}{100} \quad \text{Ec. 85}$$

- Fracción molar del  $C_{20}^+$ :

$$X[adim] = \frac{f(C20+)}{M(C20+)} * Ml \quad \text{Ec. 86}$$

e) Con los datos obtenidos experimentalmente:  $Mg$ ,  $Ml$ ,  $\rho l$ ,  $GEg$ , se procede a calcular:

- Densidad del gas a 60 °F:

$$\rho g @ 60^\circ F [gr/cc] = GEg * 0,001223 \quad \text{Ec. 87}$$

- RGL (gr líquido/gr gas):

$$RGL = \frac{RGL [PCN/BN]}{5.146 * \frac{\rho g}{\rho l}} \quad \text{Ec. 88}$$

- Fracción en peso del gas:

$$fpg[adim] = \frac{RGL \left( \frac{gr \text{ liquido}}{gr \text{ gas}} \right)}{1 + RGL \left( \frac{gr \text{ liquido}}{gr \text{ gas}} \right)} \quad \text{Ec. 89}$$

- Fracción en peso del líquido:

$$fpl[adim] = 1 - fpg \quad \text{Ec. 90}$$

- Fracción molar de la fase del gas ( $\beta$ ):

$$\beta[adim] = \frac{\frac{fpg}{Mg}}{\frac{fpg}{Mg} + \frac{fpl}{Ml}} \quad \text{Ec. 91}$$

- Peso molecular del fluido total:

$$M_{FT}[gr/mol] = \beta * Mg + (1 - \beta) * Ml \quad \text{Ec. 92}$$

f) A continuación se presenta gráficamente un resumen de este procedimiento.

Componente	Mi	SG	%W	fi	fi/Mi (moles/gr)	fi/Gei	Xi	Componente	%Xmol	%Y mol	Zi
Nitrógeno	28	0.809	<b>0.000</b>	0.000	0.00E+00	0.000	0.0E+00	Nitrógeno	0.000	<b>1.746</b>	1.650
CO <sub>2</sub>	44	0.818	<b>0.000</b>	0.000	0.00E+00	0.000	0.0E+00	CO <sub>2</sub>	0.000	<b>16.311</b>	15.410
C <sub>1</sub>	16.0	0.300	<b>0.019</b>	0.000	1.18E-05	0.001	2.1E-03	C <sub>1</sub>	0.208	<b>55.610</b>	52.550
C <sub>2</sub>	30.1	0.356	<b>0.039</b>	0.000	1.30E-05	0.001	2.3E-03	C <sub>2</sub>	0.228	<b>11.367</b>	10.752
C <sub>3</sub>	44.1	0.508	<b>0.171</b>	0.002	3.88E-05	0.003	6.8E-03	C <sub>3</sub>	0.683	<b>7.180</b>	6.821
i-C <sub>4</sub>	58.1	0.563	<b>0.136</b>	0.001	2.34E-05	0.002	4.1E-03	i-C <sub>4</sub>	0.412	<b>1.227</b>	1.182
n-C <sub>4</sub>	58.1	0.584	<b>0.385</b>	0.004	6.62E-05	0.007	1.2E-02	n-C <sub>4</sub>	1.166	<b>2.398</b>	2.330
i-C <sub>5</sub>	72.1	0.625	<b>0.088</b>	0.001	1.22E-05	0.001	2.1E-03	i-C <sub>5</sub>	0.215	<b>0.692</b>	0.666
n-C <sub>5</sub>	72.1	0.631	<b>0.495</b>	0.005	6.88E-05	0.008	1.2E-02	n-C <sub>5</sub>	1.208	<b>0.742</b>	0.768
pseudo-C <sub>6</sub>	84.0	0.690	<b>3.569</b>	0.036	4.29E-04	0.052	7.5E-02	pseudo-C <sub>6</sub>	7.478	<b>2.726</b>	2.988
pseudo-C <sub>7</sub>	95.0	0.727	<b>6.967</b>	0.070	7.33E-04	0.096	1.3E-01	pseudo-C <sub>7</sub>	12.907	<b>0.000</b>	0.713
pseudo-C <sub>8</sub>	107.0	0.749	<b>7.960</b>	0.080	7.44E-04	0.106	1.3E-01	pseudo-C <sub>8</sub>	13.093	<b>0.000</b>	0.723
pseudo-C <sub>9</sub>	121.0	0.768	<b>4.545</b>	0.045	3.76E-04	0.059	6.6E-02	pseudo-C <sub>9</sub>	6.611	<b>0.000</b>	0.365
pseudo-C <sub>10</sub>	136.0	0.782	<b>4.235</b>	0.042	3.11E-04	0.054	5.5E-02	pseudo-C <sub>10</sub>	5.481	<b>0.000</b>	0.303
pseudo-C <sub>11</sub>	149.0	0.793	<b>5.431</b>	0.054	3.64E-04	0.068	6.4E-02	pseudo-C <sub>11</sub>	6.415	<b>0.000</b>	0.354
pseudo-C <sub>12</sub>	163.0	0.804	<b>5.121</b>	0.051	3.14E-04	0.064	5.5E-02	pseudo-C <sub>12</sub>	5.529	<b>0.000</b>	0.305
pseudo-C <sub>13</sub>	176.0	0.816	<b>1.906</b>	0.019	1.08E-04	0.023	1.9E-02	pseudo-C <sub>13</sub>	1.906	<b>0.000</b>	0.105
pseudo-C <sub>14</sub>	191.0	0.826	<b>2.342</b>	0.023	1.23E-04	0.028	2.2E-02	pseudo-C <sub>14</sub>	2.158	<b>0.000</b>	0.119
pseudo-C <sub>15</sub>	207.0	0.836	<b>2.021</b>	0.020	9.78E-05	0.024	1.7E-02	pseudo-C <sub>15</sub>	1.718	<b>0.000</b>	0.095
pseudo-C <sub>16</sub>	221.0	0.843	<b>4.841</b>	0.048	2.19E-04	0.057	3.9E-02	pseudo-C <sub>16</sub>	3.855	<b>0.000</b>	0.213
pseudo-C <sub>17</sub>	237.0	0.851	<b>2.030</b>	0.020	8.57E-05	0.024	1.5E-02	pseudo-C <sub>17</sub>	1.508	<b>0.000</b>	0.083
pseudo-C <sub>18</sub>	249.0	0.856	<b>2.719</b>	0.027	1.09E-04	0.032	1.9E-02	pseudo-C <sub>18</sub>	1.922	<b>0.000</b>	0.106
pseudo-C <sub>19</sub>	261.0	0.861	<b>2.841</b>	0.028	1.09E-04	0.033	1.9E-02	pseudo-C <sub>19</sub>	1.916	<b>0.000</b>	0.106
C <sub>20</sub>	<b>317.2</b>	<b>0.8882</b>	<b>42.139</b>	0.421	1.33E-03	0.474	2.3E-01	C <sub>20</sub>	23.384	<b>0.000</b>	1.292
								% Molar	5.52	94.48	
Parámetros C <sub>19</sub>	0.777	57.861	0.579	132.916	0.745	1.00	TOTAL	99.792	99.999	99.999	
Fluido total		100.000	1.000								

Figura 128. Determinación de la composición total del fluido de yacimiento.

g) Finalmente, se calcula la composición molar del líquido y del fluido total como se indica a continuación.

- Composición molar del líquido:

$$Xi[\%] = \frac{Xi * 100}{\sum Xi} \quad \text{Ec. 93}$$

- Composición molar del fluido total:

$$Zi[\%] = (YiNorm(\%)/100 * \beta + (1 - \beta) * Xi) * 100 \quad \text{Ec. 94}$$

En la figura 129 se ilustra la metodología implementada para determinar la composición total del fluido del yacimiento, a través de la prueba de liberación instantánea (*flash*) y de la herramienta computacional *Microsoft Excel*.

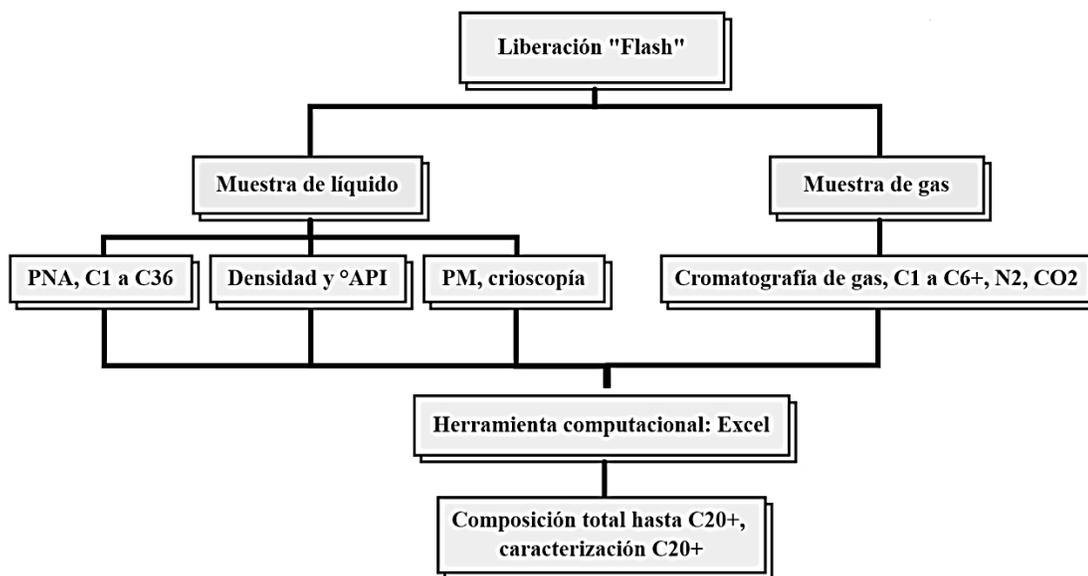


Figura 129. Esquema descriptivo del procedimiento para obtener la composición total del fluido.

## 6. Comparación de las propiedades PVT experimentales con las estimadas mediante el uso del simulador PVTsim

El procedimiento a seguir para la realización de las simulaciones composicionales en el programa PVTsim versión 20 es el siguiente:

- i. En primera instancia, definir las condiciones para la realización de la simulación. Esto equivale a seleccionar: (a) el sistema de unidades, (b) el modelo de Ecuación de Estado (EdE) a ejecutar en la corrida, (c) el método de caracterización/agrupamiento de la fracción pesada (*standard* o *ab*), (d) el procedimiento de caracterización normal o pesado aplicado al fluido (*normal* o *heavy C<sub>7+</sub>*), y (e) el tipo de modelo de viscosidad y conductividad térmica. Estos ajustes se pueden realizar a partir del conjunto de casillas que se muestran debajo de la barra de herramientas en la ventana inicial del programa

(véase figura 130), o directamente seleccionando el menú desplegable *Options* en la barra de herramientas.

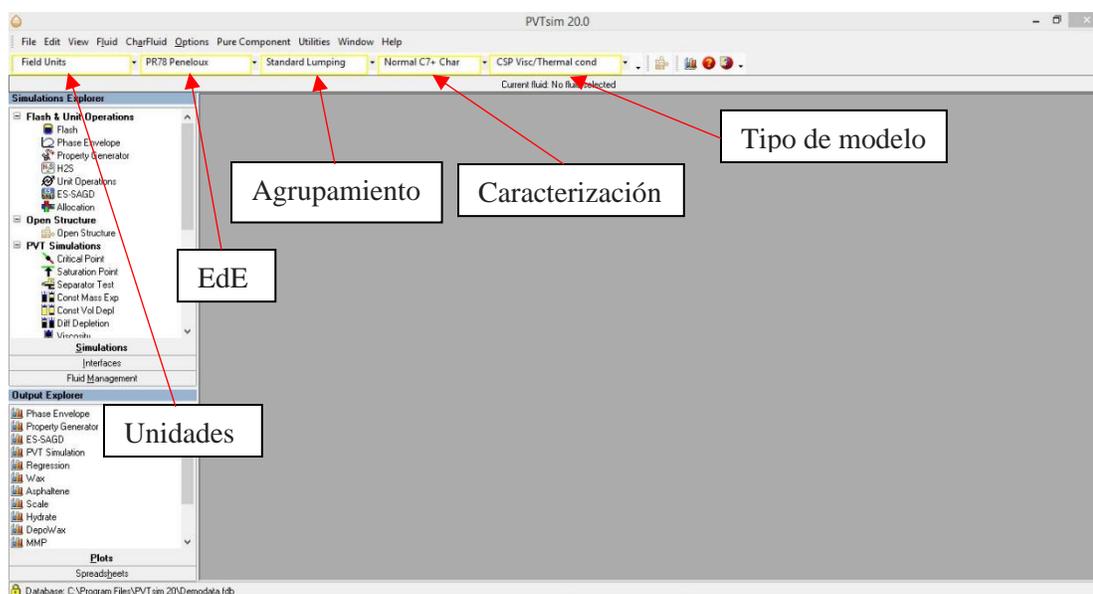


Figura 130. Ventana inicial del programa PVTsim.

En este trabajo, se seleccionaron las unidades de campo *Field Units*, el tipo de agrupamiento “*Standard*” que es el recomendado por los creadores del simulador y el mismo se basa en la división de la fracción pesada en pseudo componentes de peso aproximadamente igual, mientras que el agrupamiento “*ab*” minimiza la variación en la EdE de los parámetros “*a*” y “*b*” dentro de cada pseudo componente. Por otra parte, en la caracterización se selecciona “*Heavy C<sub>7+</sub>*” cuando se trabaja con un fluido muy aromático ( $^{\circ}\text{API} < 17$ ).

- ii. En la barra de tareas seleccionar el menú desplegable *Fluid...Enter New Fluid*, la ventana para introducir los datos del fluido emergerá en pantalla (véase figura 131). En la parte superior de la ventana, la sección *Fluid* contiene diferentes opciones para la identificación textual del fluido. Al menos el campo *Well* debe ser llenado con el nombre del pozo de donde proviene el fluido, para poder identificarlo posteriormente. En el campo *History* se introduce cualquier información relativa al fluido, por ejemplo, si ha sido sometido a regresión o si el fluido se introdujo en una versión anterior

de PVTsim. En el campo *Sample* se indica si la muestra es de fondo, superficie o es un fluido de inyección. En el campo *Test* se introduce el tipo de prueba a simular. En el campo *Fluid* se introduce la fase de la muestra, y finalmente en el campo *Text* se indica cualquier acotación respecto a la muestra. En la sección *Composition*, se ingresa la composición molar del fluido total del yacimiento y se caracteriza el pseudo componente a través de su peso molecular y su densidad; luego se selecciona la opción “*plus fraction*” y se presiona OK. En el caso de no caracterizar el pseudo componente se selecciona la opción “*save char fluid*”, luego Ok, y el programa lo caracteriza de acuerdo a la ecuación seleccionada.

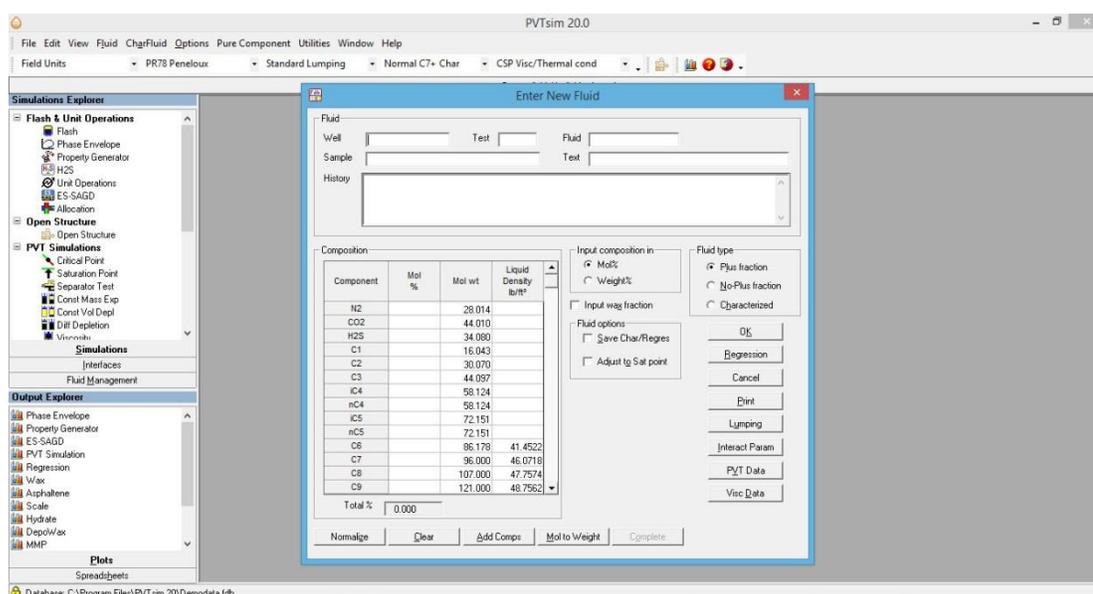


Figura 131. Ventana para introducir datos del pozo y la composición total del fluido de yacimiento.

- iii. En la ventana inicial del programa, seleccionar *Simulations* en el explorador de simulaciones (*Simulation Explorer*), luego en el menú desplegable *PVT Simulations*, se observarán los experimentos PVT disponibles para simular, estos son los siguientes: (a) Punto crítico, (b) punto de saturación, (c) prueba de separadores, (d) expansión a composición constante, (e) agotamiento a volumen constante, (f) liberación diferencial, (g) viscosidad, (h) prueba de hinchamiento, y (i) prueba de múltiple contacto.

Los parámetros a cotejar son: (a) Presión de saturación ( $P_{sat}$ ), (b) relación gas-liquido (RGL), (c)  $^{\circ}$ API, y (d) factor volumétrico del gas ( $B_g$ ). Estos parámetros son evaluados en “separator test”, al seleccionar esta opción, la ventana para introducir los datos de la prueba de separadores mostrada en la figura 132 emergerá en pantalla. Luego, se introduce la presión y la temperatura a la que se realiza la separación y la temperatura de yacimiento (Res. Temp/ $^{\circ}$ F). Cuando se presiona OK los cálculos de la prueba son ejecutados y una hoja de resultados como la mostrada en la figura 133 aparecerá en pantalla.

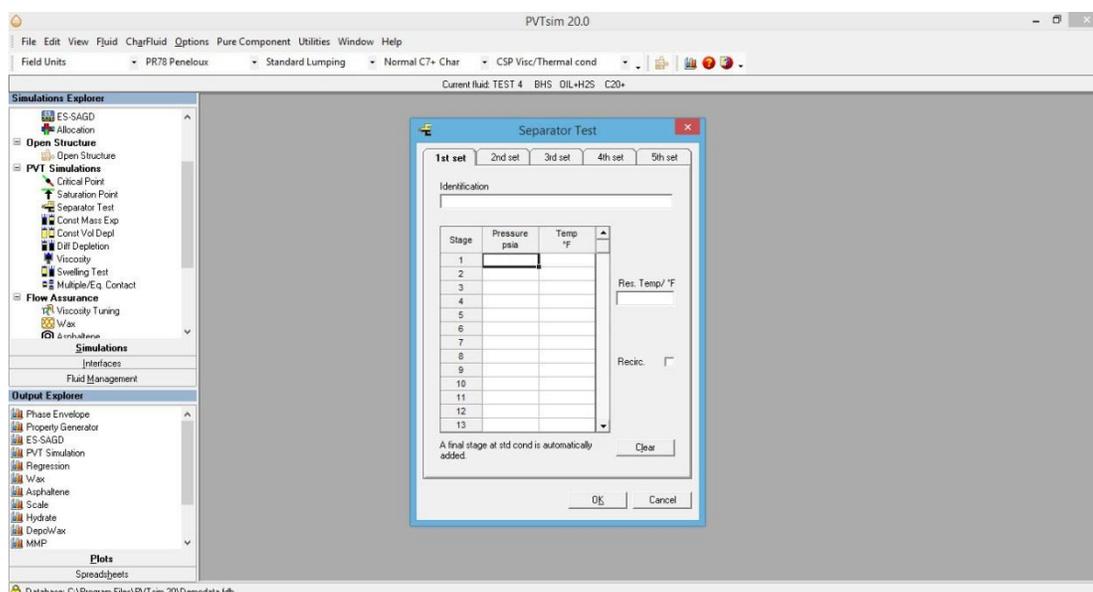


Figura 132. Ventana para introducir los datos de las condiciones de separación (presión y temperatura) y la temperatura de yacimiento.

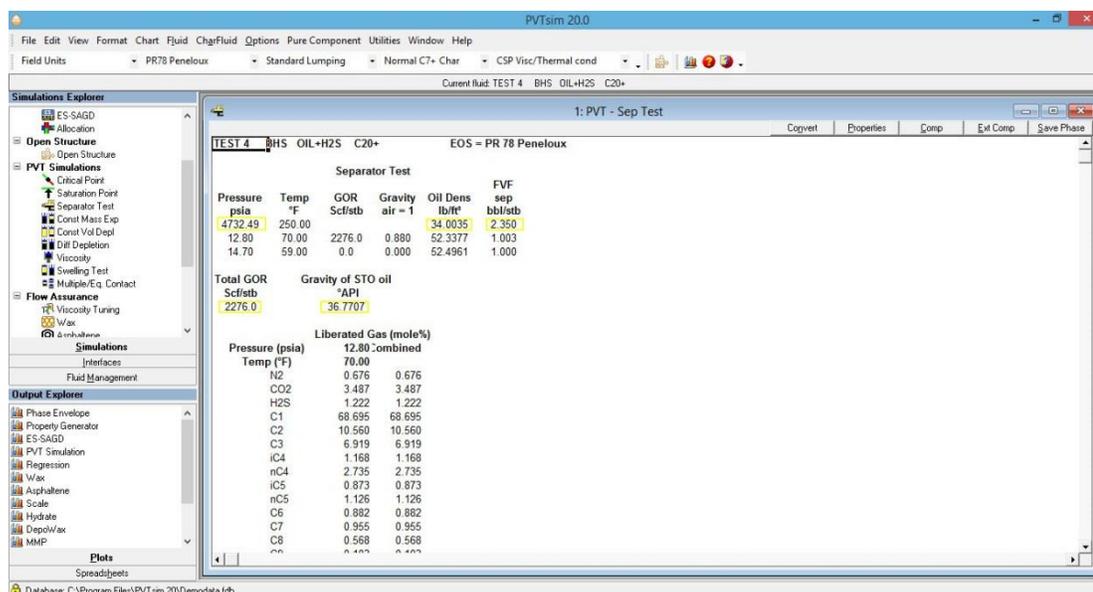


Figura 133. Hoja donde se presentan los resultados de los parámetros simulados.

- iv. Seleccionar una nueva EdE y con la misma composición ya almacenada en la base de datos del simulador, se repite el paso iii hasta evaluar dicho fluido con las nueve EdE disponibles.
- v. Una vez seleccionada la EdE que mejor representa el fluido (aquella que presente menor error porcentual en las variables consideradas en este estudio) se obtiene el diagrama de fases termodinámico para la composición de la mezcla de hidrocarburos.

Para ello, en la ventana principal del programa, seleccionar *Simulations* en el explorador de simulaciones, luego en el menú desplegable *Flash & Unit Operations* hacer doble clic en *Phase Envelope*. Una ventana para ingresar las fracciones molares y los límites de presión y temperatura emergerá en pantalla. Una vez introducida la información requerida, se presiona OK y se obtendrá el diagrama de fases correspondiente.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con sus respectivos análisis, en la realización de este trabajo de investigación de acuerdo con la metodología planteada en el capítulo anterior.

#### **Revisión del manual de usuarios del sistema Chandler PVT 3000 de *Chandler Engineering***

El manual del sistema Chandler PVT 3000 de Chandler *Engineering* consta de ocho segmentos. El primer segmento proporciona información generalizada sobre la utilidad del sistema y la finalidad con que este fue diseñado, así como también expresa las características y especificaciones técnicas del horno y de los componentes celda bomba y celda auxiliar que lo conforman.

Aunado a esto, este segmento describe detalladamente la función de cada válvula del horno, así como la operación del programa PVT 3000. Esto último es de gran importancia, debido a que a través de dicho programa se establecen las configuraciones de calibración de la celda bomba, celda auxiliar, presión barométrica, transductor de presión y demás componentes; necesarias para la ejecución de una prueba. Además, permite monitorear de forma continua y en tiempo real, la presión, el volumen, y la temperatura en la celda que se esté utilizando.

Por último, en esta sección se explican los procedimientos de calibración de volumen, mantenimiento, y experimentales para la celda bomba y celda auxiliar. Sin embargo, es importante señalar que este manual no expone claramente las instrucciones de trabajo para la ejecución de las pruebas, sino se enfoca más bien en la descripción de las funciones y características de cada componente del horno. En tal

sentido, esta investigación se vio en la necesidad de coordinar una serie de visitas técnicas a la empresa PDVSA – Intevep con motivo de participar en el desarrollo de pruebas convencionales llevadas a cabo en el sistema de medición homólogo de dicha empresa. Estas actividades permitieron establecer de forma precisa las instrucciones de trabajo requeridas por esta investigación, basado en el conocimiento adquirido durante el periodo de capacitación.

Por otra parte, en el segundo segmento se cubre en líneas generales la descripción del funcionamiento del gasómetro, sus características y especificaciones. Es importante destacar que en este segmento se explica detalladamente la función de cada una de las válvulas, puertos, y demás subcomponentes del gasómetro. Para ello, se hace uso de ilustraciones esquemáticas que facilitan la ubicación de cada uno de los elementos.

En cuanto a los segmentos tres y cuatro, estos son de gran importancia puesto que describen el sistema de bombeo. En primer lugar, se aclara la funcionalidad de los componentes físicos que integran dicho sistema. En este sentido, se subdivide al equipo en siete componentes primarios, conformados por los cilindros, las válvulas de volumen constante, los transductores de presión, el controlador electrónico, el serial aislador, la computadora portátil, y las tuberías y cableado. Adicionalmente, se indican las instrucciones operativas para el chequeo de los componentes, con el propósito de garantizar la operación segura del sistema de bombeo.

En segundo lugar, se evidencia la funcionalidad del programa *PumpWorks*, estableciendo de esta manera los conocimientos básicos requeridos para la operación de las bombas. Para ello, se subdivide la aplicación en cuatro elementos principales, conformados por la barra de títulos, la barra de menú, la ventana principal o ventana de controles y datos, y la barra de estado. Es de hacer notar que se hace énfasis en la explicación de los diferentes modos operativos disponibles.

En el siguiente segmento la compañía describe el cilindro portamuestras. Al respecto, en este manual se expresa la utilidad de este componente, sus especificaciones y características principales. Es importante destacar que en esta sección se explica el mantenimiento del cilindro.

En referencia a los segmentos seis, siete y ocho, el manual describe el funcionamiento del resto de componentes del equipo, el separador *flash*, la celda de recombinación, y el sistema de resonancia acústica. Es importante destacar que en estas secciones se explica detalladamente el procedimiento operativo del separador.

Finalmente en términos generales es de hacer notar que la revisión del manual de operaciones contribuye en la identificación de los componentes del sistema Chandler PVT 3000, pero presenta debilidades en cuanto a los procedimientos experimentales, así como falta de los diagramas de flujo de las pruebas.

### **Revisión e instalación de los componentes del sistema Chandler PVT 3000**

Es importante destacar que antes de dar inicio al proceso de instalación del sistema, se tomaron en cuenta los requerimientos de espacio, conexiones de corriente, voltaje, y otras conexiones necesarias para el buen funcionamiento del mismo. En consecuencia se distribuyeron los equipos de forma tal de generar una óptima accesibilidad a los mismos. Se tomó la precaución de ubicar el horno en una posición que impidiera a su puerta trasera ser bloqueada por la pared, como lo dicta el manual del sistema. Posteriormente, se realizó la instalación eléctrica de las líneas de corriente y voltaje necesarias para cada componente que lo necesita; parte de este proceso se puede observar en la figura 134.



*Figura 134.* Instalación de líneas de corriente.

## **1. Revisión del panel de control**

### **1.1. Las conexiones de cables**

Inicialmente, se hizo una revisión de las conexiones de cables en los componentes del panel de control. Los mismos están correctamente conectados en sus respectivos equipos, y no presentan ningún tipo de falla.

### **1.2. Encendido de los equipos y monitores**

En el momento de dar inicio al encendido de los equipos del panel de control, no se evidenció falla alguna. Sin embargo, en circunstancias de corte de energía generalizado, y luego de activar el procedimiento de reinicio de los equipos una vez reestablecida la energía, se presentó falla en el encendido del CPU. No obstante, luego de una exhaustiva revisión técnica, se limpiaron las tarjetas de memoria RAM y la falla fue solventada.

### **1.3. Funcionamiento del programa PVT3000**

El programa de control del sistema Chandler PVT 3000 funciona correctamente y no presentó ningún tipo de falla.

## **2. Revisión de los subcomponentes del horno y sistema de flujo**

### **2.1. Celda bomba**

La celda bomba tenía invertidos los interruptores y sensores límite para el control de movimiento del pistón, los cuales se localizan debajo del horno, en la sección correspondiente a los componentes mecánicos y electrónicos. Esto se pudo verificar luego de una revisión exhaustiva de los planos electrónicos incluidos en el manual de usuarios del sistema Chandler PVT 3000. Luego de los ajustes pertinentes, los dispositivos electrónicos quedaron correctamente instalados, como se muestra en la figura 135.



Figura 135. Interruptores y sensores límite para el control de viaje de la celda bomba.

Dónde:

A= Interruptor inferior de límite de viaje para la celda bomba

B= Sensor límite inferior “home”

C= Interruptor superior de límite de viaje para la celda bomba

D= Sensor límite superior

### 2.2. *Celda de gas condensado (celda auxiliar)*

Con respecto a la revisión de la celda auxiliar, se observó que la base de la celda y la base de la barra vertical que sostiene el anillo magnético externo se encontraban desajustadas. Una vez realizados los ajustes pertinentes, la celda quedó instalada y funcionando correctamente.

### 2.3. *Mini-celda*

La mini-celda se encuentra en perfecto estado y no presentó fallas.

### 2.4. *Viscosímetro capilar*

Este subcomponente no presentó falla alguna al momento de su revisión.

### 2.5. Sistema de resonancia acústica (ARS)

Inicialmente la termocupla superior estaba desconectada, y la cubierta del contenedor superior se encontraba desajustada, sin embargo esta pudo instalarse correctamente y se encuentra en funcionamiento.

### 2.6. Sistema de flujo

Con respecto al sistema de flujo del horno, conformado por una serie de válvulas de operación manual y tuberías resistentes a altas presiones, se realizó una revisión con rigurosidad, debido a que por este sistema fluye la muestra del yacimiento y el aceite hidráulico de la bomba externa. De esta manera, se observó que las líneas de flujo internas se encuentran instaladas correctamente y no presentan fuga alguna.

Finalmente, se instalaron las válvulas de seguridad Ruska en los puertos *AUXILIARY CELL CHARGE IN/OUT* y *GAS IN/OUT* para proporcionar un mayor control y seguridad al usuario al momento de inyectar o extraer fluido a alta presión, y las tuberías externas que permiten la interconexión entre el horno, bomba Quizix, y el cilindro portamuestra.

Todos los puertos del sistema Chandler PVT 3000 fueron provistos con sus respectivos juegos de válvulas de diversas naturalezas como fueron establecidos en el marco metodológico para llevar a cabo estudios de muestras de gas condensado usando la celda para este estudio (celda auxiliar); sin embargo cabe destacar que el conjunto de válvulas de seguridad (MV1, MV2 y MV3) se podrían intercambiar de puerto y usar en el estudio de otros fluidos; como por ejemplo si se quiere llevar a cabo estudios PVT en muestra de petróleo negro, se conecta este conjunto de válvulas de seguridad preestablecidas en el puerto *PUMP CELL CHARGE IN/OUT*.

En la figura 136 (a) se pueden apreciar los puertos de válvulas originalmente sin ninguna conexión de válvula de seguridad.

Luego de un proceso de aprendizaje sobre elaboración de líneas y conexiones de alta presión e instalación de válvulas de seguridad, como se puede apreciar en la

figura 136 (b) se pudo llevar a cabo las diversas conexiones requeridas para los diferentes puertos y válvulas de seguridad que integran el equipo; en esta figura se puede visualizar las conexiones de: (1) línea con conexión como roscado (autoclave) por la cual circula aceite hidráulico (desde bomba Quizix –MV17); (2) línea con conexión HIP ,por la cual se hace circular muestra (petróleo/gas) (desde MV15-MV1); línea con conexión *straight* hembra por donde circula aceite hidráulico (desde bomba Quizix-válvula MV16 del cilindro portamuestra); (3) válvula con conexión tipo aguja la cual va a su vez conectada a un vial de vidrio.

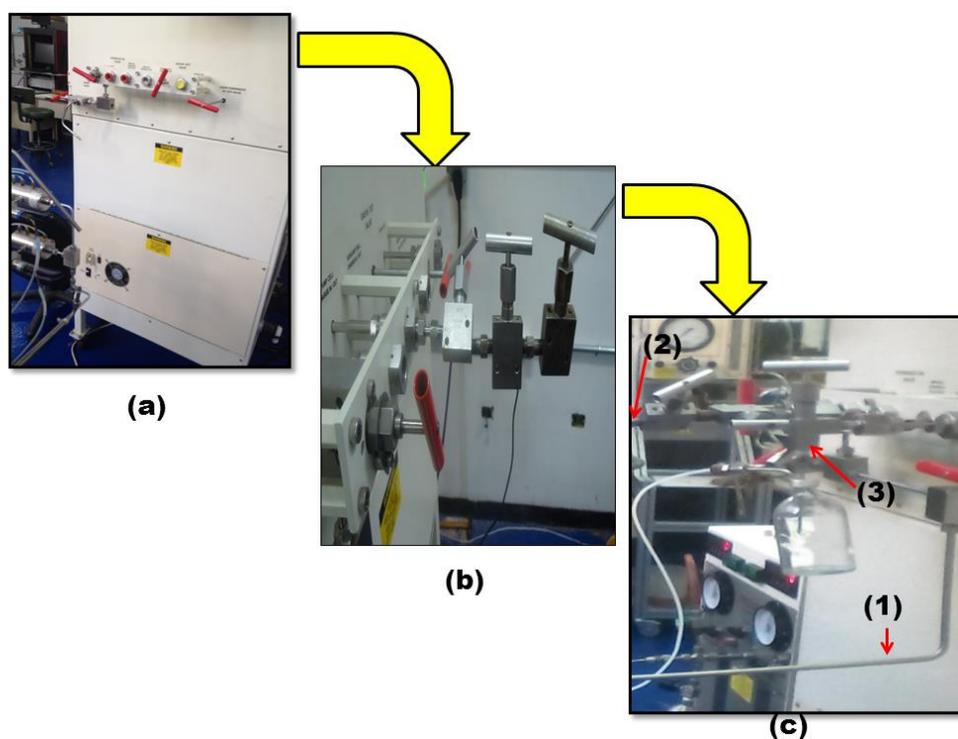


Figura 136. Ensamblaje de puertos y válvulas de seguridad del sistema Chandler PVT 3000.

### 3. Revisión de las bombas Quizix

#### 3.1. Funcionamiento del programa PumpWorks

El programa de control de la bomba Quizix no presentó fallas de ningún tipo.

### 3.2. Tuberías y válvulas

En lo que respecta a los subcomponentes físicos de las bombas, al momento de realizar la verificación del funcionamiento de las válvulas de volumen constante (véase procedimiento técnico: Verificación y operación de las bombas Quizix), se observó que las líneas flexibles que proveen aire comprimido a baja presión (100 lpc) del solenoide piloto hacia las válvulas de volumen constante estaban conectadas de forma incorrecta, generando fallas en el proceso de carga de aceite hidráulico del reservorio a los cilindros.

Por tal motivo, se procedió a conectar las líneas conforme al código de colores de sus marcas o etiquetas, siguiendo las pautas establecidas por el manual de usuarios de las bombas Quizix. Así pues, las líneas etiquetadas con un color marrón se conectaron de la válvula etiquetada con color marrón hasta el solenoide piloto identificado con una etiqueta de color marrón, y así sucesivamente para cada una de las ocho líneas de distinto color (véase figura 137).

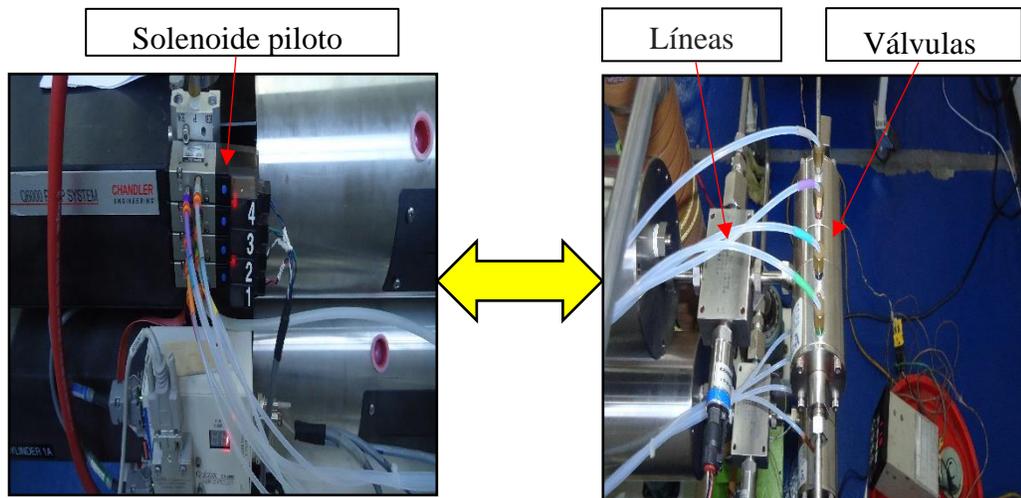


Figura 137. Instalación de las líneas flexibles de distribución de aire.

De manera similar, se pudo observar que la tubería conectada al puerto de salida del disco de ruptura de seguridad estaba instalada parcialmente. En tal sentido, se procedió a completar su instalación hacia un recipiente seguro a condiciones

atmosféricas para prevenir que el fluido hidráulico se esparza en el laboratorio en caso de que el disco de ruptura de seguridad se active.

Por otra parte, para cumplir con los requerimientos de flujo de aire de la bomba, se utilizó un compresor, el cual fue calibrado para un rango de 70 a 110 lpc. El compresor fue conectado a la bomba en el múltiple del solenoide piloto a través de una manguera.

Por último, se instalaron las líneas de flujo que conectan la bomba con el horno y el cilindro portamuestra, y se verificó que estuvieran debidamente ajustadas y que no presentaran fuga alguna.

En cuanto a lo anterior se debe señalar que surgió la necesidad de rediseñar el proceso de ensamblaje de las tuberías, respecto a lo estipulado por el fabricante en el diagrama de flujo incluido en el manual de usuarios del equipo. Esto debido a que no se contó con el accesorio en forma de T que permite realizar conexiones a tres bandas, proporcionando a los cilindros de la bomba la capacidad de operar en modo de emparejamiento, y mantener de esta manera un flujo de fluido constante.

Por otra parte, en la figura 138 (a) se puede observar las condiciones iniciales en la cual se encontraba la bomba Quizix, se puede notar que no contaba con ningún tipo de conexión ni con el Sistema Chandler PVT 3000, ni con el compresor neumático necesario para su funcionamiento.

En la figura 138 (b) se observan las disposiciones de las conexiones y líneas de las bombas Quizix ya completadas en su totalidad; las cuales van acorde a la operatividad independiente de cada bomba y no a funcionamientos sincronizados, es decir, la bomba 1A en primer lugar fue utilizada para llevar a cabo la inyección de la muestra a la celda auxiliar, luego fue implementada para presurizar la muestra del cilindro portamuestra a condiciones de yacimiento (presión de yacimiento), mientras que el pistón de la bomba 1B fue empleado para realizar la inyección o extracción de aceite hidráulico a la celda auxiliar durante todas las pruebas PVT ejecutadas; en esta figura también se puede observar la manguera que proporciona aire a las bombas Quizix proveniente de un compresor neumático.

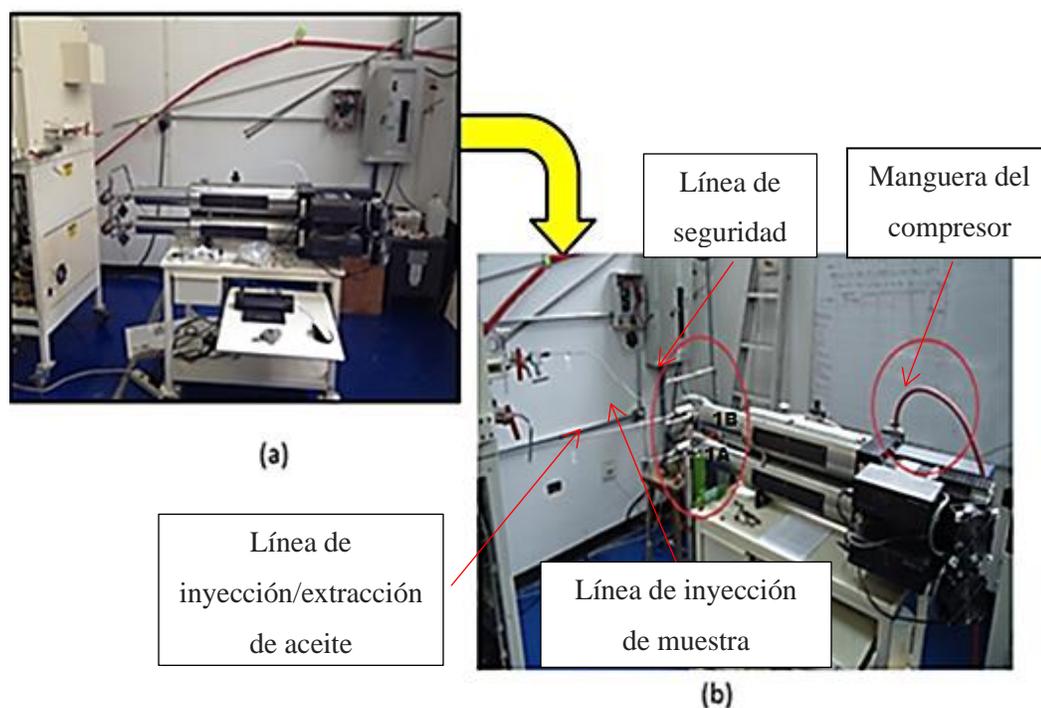


Figura 138. (a) Bombas en condiciones iniciales, (b) bombas completamente instaladas.

#### 4. Revisión del gasómetro

Este componente funciona correctamente. Sin embargo, en relación a la conexión tipo cruz, se presentó el inconveniente de no contar con los conectores rápidos con los diámetros adecuados; por lo que se optó por utilizar roscas swagelok de un material más resistente como el cobre para evitar el aislamiento de la rosca en aquellas secciones de la cruz en las cuales se efectúa el enrosque con mayor frecuencia.

#### 5. Revisión del separador

Se llevó a cabo la instalación del equipo de baño térmico, sin embargo al ser probado en el separador se evidencio fugas de agua en la base del termómetro atmosférico, sin embargo la misma pudo ser controlada (véase figura 139).

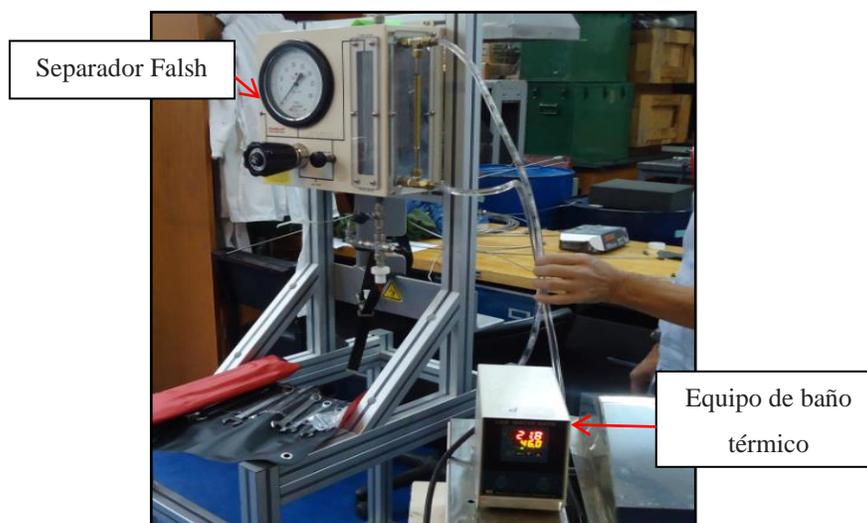


Figura 139. Re-disposición del equipo de baño térmico.

## 6. Revisión del cilindro portamuestra

Inicialmente, los cilindros fueron desarmados para proceder con su revisión exhaustiva. De este modo se observó que el sello tipo o-ring del pistón estaba instalado incorrectamente. Por tal motivo, se procedió a instalarlo en medio de los sellos tipo pistas, con la finalidad de prevenir pequeñas fisuras en el pistón que pudieran ocasionar comunicación de los fluidos. De la misma manera se lubricó el pistón con grasa de vacío. Finalmente, se procedió a troquelar el cuerpo de todos los cilindros para su identificación.

## 7. Revisión de equipos auxiliares

### 7.1. Crioscopio Cryette WR 5009

Este equipo evidenció fallas relacionadas con lecturas incorrectas durante el desarrollo de los procedimientos de calibración establecidos en el manual de usuarios del fabricante. En este sentido, se recomienda una revisión técnica del equipo por parte de un instrumentista. Es por esta razón que las mediciones de peso molecular en esta investigación se ejecutaron en el crioscopio Cryette homólogo de PDVSA-Intevep.

### 7.2. **Bomba de vacío**

Este componente se encuentra en perfecto estado y no presentó ningún tipo de falla.

### 7.3. **Compresor de aire**

Inicialmente se detectó una falla en el manómetro de salida del equipo, sin embargo este fue reemplazado y el compresor funcionó correctamente.

### **Prueba de fugas**

En lo que respecta a la prueba de fugas realizada a las tuberías, conexiones y válvulas que conectan la bomba Quizix con el horno, no se evidenció fugas en ninguna parte del sistema. La tubería fue presurizada hasta la presión de trabajo (presión de inyección) de 9000 lpc.

### **Calibración del volumen de la celda auxiliar**

El volumen mínimo de la celda auxiliar fue de 42,13 cc para la presión máxima de 20000 lpca a una temperatura de 100°F. Por otra parte el volumen máximo al cual llegó el pistón flotante al tope de la celda auxiliar fue de 1022,5 cc (volumen máximo obtenido una vez extraído el aceite hidráulico e inyectado aire en la cámara de muestra de la celda auxiliar hasta que este ocupe toda la capacidad de la misma a una temperatura de 100 °F).

Se debe mencionar que durante el desarrollo de este procedimiento, se observó una fuga importante de aceite hidráulico en la cubierta superior de la celda auxiliar; esto también se confirmó con el incremento inusual en el volumen. Ante esta situación, se actuó deteniendo la bomba 1B y cerrando la válvula de la bombona de aire. Al mismo tiempo, se realizó una purga del aire contenido en la celda auxiliar abriendo la válvula *GAS IN/OUT VALVE* y la válvula de seguridad del puerto *GAS IN/OUT*, esto con el propósito de aliviar la alta presión en el interior de la celda.

Una vez protegidos los componentes electrónicos del equipo, se procedió a disminuir la temperatura del horno mediante el programa PVT3000, seguidamente se abrió la puerta del horno para contribuir a que disminuyera la temperatura del mismo de manera más rápida y se procedió a apagar el equipo (véase procedimiento técnico: Apagado y desmontaje del sistema).

Finalmente, se concluyó que la fuga de aceite hidráulico por la cubierta superior de la celda auxiliar se originó por un mal ajuste de la misma durante su ensamblaje, lo cual provocó que se dañara un sello del tope de la celda. El sello fue reemplazado (véase procedimiento técnico: Mantenimiento de la celda auxiliar), quedando la celda auxiliar en correcto funcionamiento. En la figura 140 se muestran los juegos de sellos defectuosos y su respectivo reemplazo.

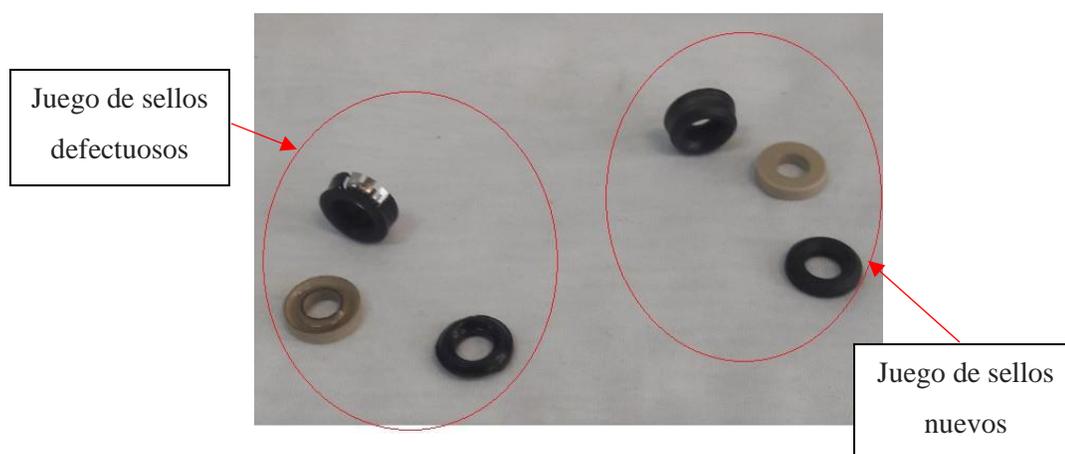


Figura 140. Sellos de la celda auxiliar.

### Ejecución de estudio PVT convencional en el sistema Chandler PVT 3000

El estudio PVT realizado en esta investigación estuvo basado en el análisis de una muestra de fluido de gas condensado. La muestra, capturada a condiciones de fondo de pozo fue enviada al laboratorio PVT de la UCV. La presión de apertura en el laboratorio fue consistente con la presión de cierre de 9000 lpca reportada en campo. Los detalles de la muestra recibida y la información del pozo son presentados en la tabla 20.

#### *Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados*

Una porción del fluido equivalente a 70 cc fue cargada a la celda de gas condensado de alta presión, la cual fue precalentada a la temperatura del yacimiento de 289,9 °F. Luego, el fluido fue sometido a una liberación instantánea a condiciones de laboratorio (13,32 lpca y 70,9 °F) con la finalidad de obtener algunos parámetros PVT tales como: relación gas-líquido (RGL), densidad del líquido ( $\rho_l$ ), factor volumétrico ( $\beta_g$ ), y la gravedad API; además los análisis de gas y líquido para determinar la composición total del fluido del yacimiento fueron realizados en un cromatógrafo con las columnas apropiadas para cada fase. Esta composición, así como las propiedades medidas se reportan en la sección 1: Liberación instantánea en una etapa.

Continuando con el estudio, el fluido fue sometido a una expansión a composición constante durante la cual exhibió una presión de punto de rocío de 5377,7 lpca. El resultado de esta expansión se muestra en la sección 2: Prueba de expansión a composición constante.

Luego, la muestra fue re presurizada hasta obtener una condición monofásica y el volumen en el punto de rocío fue medido. El fluido fue sometido a un estudio de agotamiento a volumen constante a 289,9 °F. Este tipo de agotamiento consiste de varias expansiones y desplazamientos a presión constante, con cada desplazamiento terminando en el volumen original de la muestra a la presión del punto de rocío. Este agotamiento simula bastante bien el comportamiento de este tipo de fluidos a medida que la presión del yacimiento desciende. El volumen de la condensación retrograda fue medido durante el agotamiento y esta información se presenta en la sección 3: Prueba de agotamiento a volumen constante.

Tabla 20. Identificación de la muestra.

Pozo: UCV-01			
Profundidad Muestreo: <b>11332 pies</b>			
Campo: Oriente.			
Condiciones del Yacimiento			
Muestra Identificación	Presión(lpca)	Temperatura (°F)	Profundidad (TVDSS)
WD	9000	289,9	11332

**1. Liberación instantánea en una etapa (flash inicial)**

En la tabla 21 se muestran los datos experimentales de la liberación instantánea.

Tabla 21. Datos experimentales de la liberación instantánea (muestra WD).

Datos experimentales	
Presión barométrica	27,32 “Hg
Temperatura ambiente	70,9 °F
Presión de carga	8985,8 lpca
Temperatura de la celda	289,9 °F
Volumen de muestra inicial	59,848 cc
Volumen de muestra final	42,679 cc
Volumen de gas liberado	5498 cc
Peso del separador vacío	103,790 g
Peso del separador c/crudo	105,921 g
Densidad del líquido	0,8187 g/cc a 60 °F
Gravedad específica del gas	0,990 a 60°F
Factor de la bomba	1 ml/mm

Los datos experimentales de la tabla 21 se introdujeron en una hoja de cálculo de la herramienta computacional *Microsoft Excel*, obteniéndose los resultados de las propiedades que se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Resultados de las propiedades obtenidas del flash.

<b>Resultados experimentales</b>	
<b>Factor volumétrico de formación del gas:</b>	<b><math>\beta_g</math></b>
A presión de carga y temperatura de celda	0,00349 PCY/PCN
A presión de rocío y temperatura de celda	0,00406 PCY/PCN
<b>Densidad de la muestra:</b>	<b><math>\rho_m</math></b>
A presión de carga y temperatura de celda	0,4706 gr/cc
A presión de rocío y temperatura de celda	0,4047 gr/cc
<b>Relación gas-liquido (RGL):</b>	10609 PCN/BN
°API a 60 °F:	41,0
<b>Gravedad específica a 60/60:</b>	0,990

A partir de los análisis cromatográficos realizados a las muestras de gas y líquido recolectadas del *flash* se obtuvo la composición total del fluido original. En la tabla 23 se muestran los resultados obtenidos desde C<sub>1</sub> hasta C<sub>20+</sub>, N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.

El resultado de la composición muestra que el fluido se ajusta a las características de un fluido tipo gas condensado, según lo ha indicado Rojas, (2003) y otros autores. El contenido de la fracción C<sub>7+</sub> es 4,88%, el color del condensado a condiciones del tanque es amarillo claro (véase Aspectos Generales, Capítulo II).

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados

Tabla 23. Composición del fluido de yacimiento (muestra WD) a 289,9 °F y 8985,8 lpca.

Componente	Gas % molar	Líquido % molar	Fluido total % molar
Nitrógeno	1,746	0,000	1,650
Metano	55,610	0,208	52,550
Dióxido de carbono	16,311	0,000	15,410
Etano	11,367	0,228	10,752
Propano	7,180	0,683	6,821
i-Butanos	1,227	0,412	1,182
n-Butanos	2,398	1,116	2,330
i-Pentanos	0,692	0,215	0,666
n-Pentanos	0,742	1,208	0,768
Hexanos	2,726	7,478	2,989
Heptanos	0,000	12,907	0,713
Octanos	0,000	13,093	0,723
Nonanos	0,000	6,611	0,365
Decanos	0,000	5,481	0,303
Undecanos	0,000	6,415	0,354
Dodecanos	0,000	5,529	0,305
Tridecanos	0,000	1,906	0,105
Tetradecanos	0,000	2,158	0,119
Pentadecanos	0,000	1,718	0,095
Hexadecanos	0,000	3,855	0,213
Heptadecanos	0,000	1,508	0,083
Octodecanos	0,000	1,922	0,106
Nonadecanos	0,000	1,916	0,106
C20+	0,000	23,384	1,292
	100,000	100,000	100,000
% molar	94,5	5,5	100,0
Peso Molecular	28,66	176,0	36,8
PROPIEDADES C <sub>20+</sub> (Calculadas)			
Gravedad específica a 60°F			0,888
Peso molecular			317
PROPIEDADES DEL FLUIDO TOTAL			
Peso Molecular (gr/mol)			36,8
Relación gas-petróleo (PCN/BN)			10609
Gravedad específica del gas a 60°F			0,990
Gravedad API del petróleo de tanque a 60°F			41,0
CONDICIONES DE SEPARACIÓN			
Presión (lpca)			13,32
Temperatura (°F)			70,9

**2. Prueba de expansión a composición constante (CCE).**

La tabla 24 muestra los resultados de la prueba de expansión a composición constante para el fluido de la muestra de gas condensado. La presión del punto de rocío del sistema de hidrocarburos se determinó visualmente a través del instrumento boroscopio, y su valor fue de 5377,7 lpca a 289,9 °F. Además de los valores de volumen relativo reportados, la tabla incluye el porcentaje v/v de líquido retrogrado medido a presiones por debajo de la presión de saturación.

Tabla 24. Expansión a composición constante del fluido WD a 289,9 °F.

	<b>Presión (lpca)</b>	<b>Volumen Relativo (V/Vsat)</b>	<b>% Liq. Ret. (Vliq/Vsat)</b>
	8985,9	0,8599	
	8505,3	0,8707	
	8000,2	0,8844	
	7495,1	0,9036	
	6990,1	0,9235	
	6487,6	0,9463	
	5983,8	0,9733	
	5779,5	0,9859	
<b>Psat</b>	<b>5377,7</b>	1,0000	0,00
	5377	1,0141	2,14
	5225,3	1,0478	2,20
	4975	1,0486	2,68
	4774,5	1,0690	3,21
	4572,7	1,0930	4,05
	4374,8	1,1268	6,03
	4178,2	1,1516	6,55
	3976,4	1,1866	7,38
	3467,5	1,3064	8,97
	2691,4	1,4801	10,71
	2452,2	1,7464	11,23
	1945,9	2,1746	11,01
	1669,6	2,5273	10,71

Los datos de volumen relativo y porcentaje v/v de líquido retrogrado condensado, tabulados en la tabla 24 se grafican como una función de la presión y el resultado se muestra en la figura 141 y figura 142 respectivamente.

En referencia al grafico relación presión-volumen para la muestra de gas condensado (figura 141), se debe considerar que no es posible percibir fácilmente un cambio en la tendencia de la curva que indique un estado monofásico (gas) por

encima del punto de rocío y un estado bifásico (gas y líquido condensado) por debajo del punto de rocío, como si es posible observar en muestras de petróleo negro por encima y por debajo del punto de burbuja.

Este comportamiento puede ser explicado a partir de las características del gas condensado. Este tipo de fluidos al ser altamente compresibles, no evidencian un cambio significativo en la compresibilidad total de la mezcla al momento de ocurrir el punto de inflexión o punto en el cual se condensa líquido retrogrado del gas.

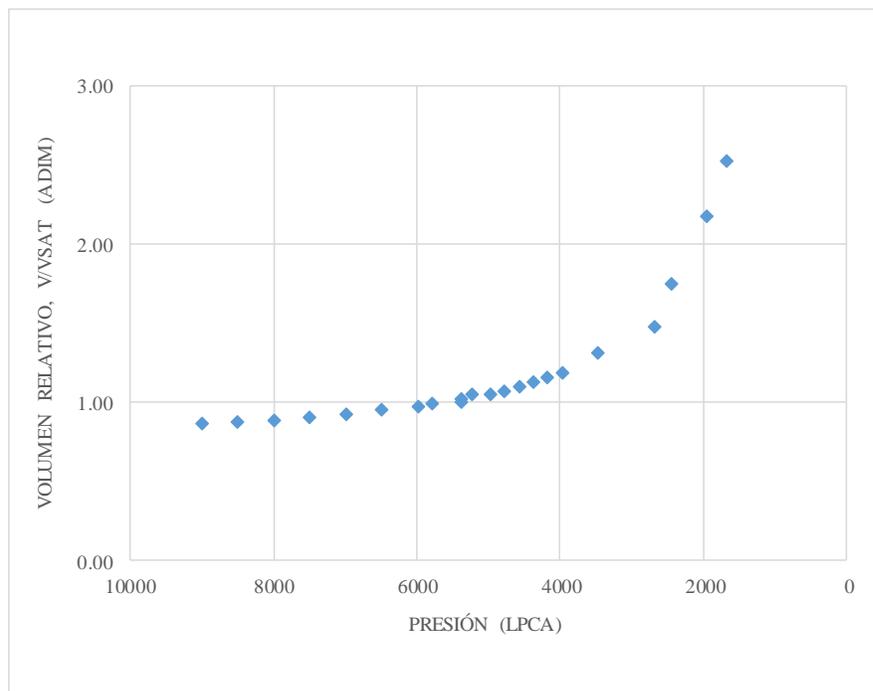


Figura 141. Relación presión-volumen del fluido. Prueba CCE.

En todo caso, se hace necesario al momento de reportar los resultados, un respaldo para la lectura visual de la presión de rocío. Esto se puede lograr a partir de la gráfica de volumen de líquido condensado contra presión (figura 142). Esta grafica es extrapolada a un volumen de líquido cero y la presión en este punto es registrada como el punto de rocío.

Sin embargo, en esta figura se puede apreciar una discontinuidad en el primer paso de reducción de presión por debajo del punto de rocío. Esto está relacionado con las dificultades inherentes a la medición de pequeños volúmenes de líquido

condensado. Un volumen de líquido entre 0,5 cc y 1 cc pudo perderse de esta lectura debido a que mojaba las paredes internas de la celda auxiliar después de permitido el tiempo de reposo de 0,5 horas entre lecturas. De ahí que los volúmenes de líquido medidos apenas por debajo de la presión de rocío estén asociados a incertidumbres. Por esta razón, estas mediciones no pueden ser recomendadas para extrapolación.

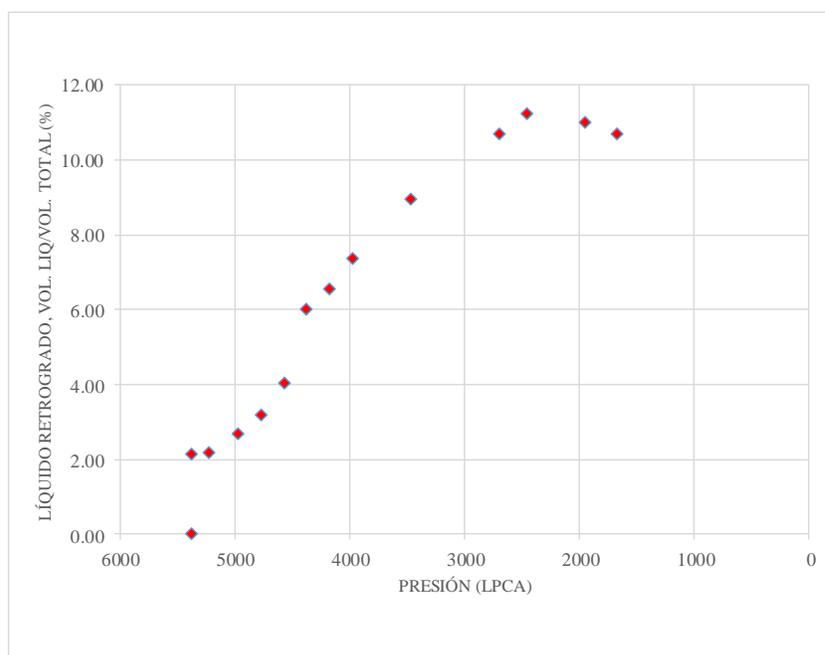


Figura 142. Formación de líquido retrogrado durante la prueba CCE.

Por lo antes expuesto, en esta investigación se aplicó la función Y extendida ( $Y_{EXT}$ ) para determinar la presión de rocío gráficamente (véase Ec. 27 en Capítulo II) y poder de esta manera evaluar la consistencia de los resultados experimentales obtenidos por el uso del sistema Chandler PVT 3000.

Los valores de la función  $Y_{EXT}$  obtenidos en cada etapa de presión para la muestra WD son mostrados en la tabla 25. Cuando la función  $Y_{EXT}$  fue graficada contra la presión, se obtuvo un gráfico con una curva cóncava como se muestra en la figura 143. Cuando el logaritmo de la función ( $\text{Log}Y_{EXT}$ ) fue graficado contra la presión, se obtuvo una línea recta por encima del punto de rocío observado, y una curva polinómica por debajo del punto de rocío observado. Estas curvas fueron extendidas y la presión en el punto donde ellas se cortan fue registrada como la

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados

presión de rocío (véase figura 144). La diferencia entre el valor observado y el valor graficado para la muestra WD fue menor que 2,0 %.

Tabla 25. Datos calculados de  $Y_{EXT}$  y  $\text{Log } Y_{EXT}$  para la muestra de gas condensado.

	<b>Presión (lpca)</b>	<b>Función <math>Y_{EXT}</math></b>	<b>Log <math>Y_{EXT}</math></b>	
<b>Pi</b>	8985,9			
	8505,3	4,231	0,626	
	8000,2	3,850	0,585	
	7495,1	3,263	0,514	
	6990,1	3,000	0,477	
	6487,6	2,766	0,442	
	5983,8	2,532	0,404	
	5779,5	2,433	0,386	
	<b>Psat</b>	5377,7	2,464	0,392
		5377	2,239	0,350
5225,3		1,914	0,282	
4975,5		2,034	0,308	
4774,5		1,927	0,285	
4572,7		1,811	0,258	
4347,8		1,653	0,218	
4178,2		1,577	0,198	
3976,4		1,467	0,166	
3467,5		1,182	0,073	
2641,4	0,971	-0,013		
2452,2	0,705	-0,152		
1945,9	0,512	-0,290		
1669,6	0,420	-0,377		

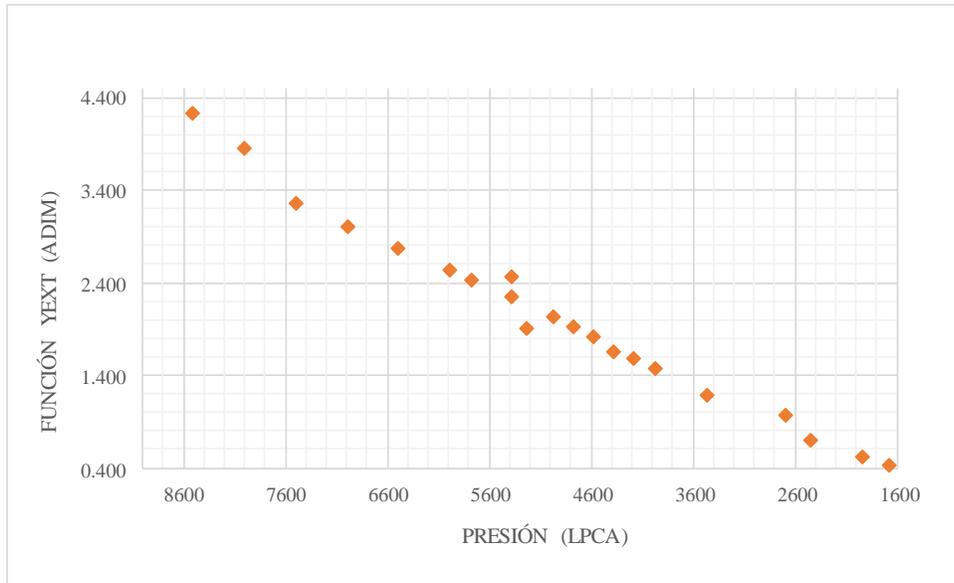


Figura 143. Función YEXT y presión para la muestra de gas condensado.

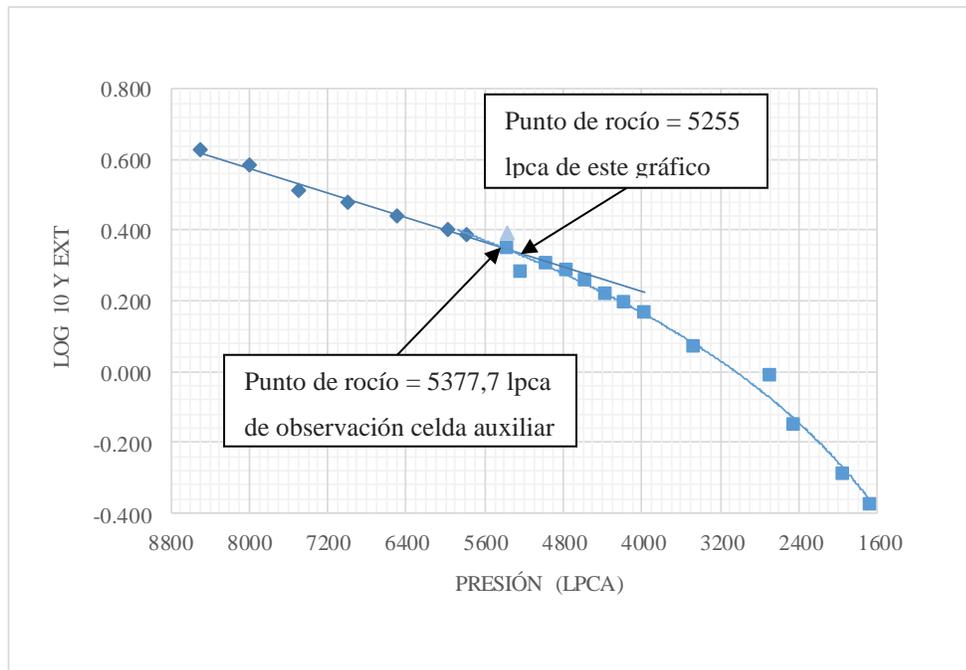


Figura 144. Grafico para determinar la presión del punto de rocío mediante el método de la función YEXT para la muestra de gas condensado.

### 3. Prueba de agotamiento a volumen constante (CVD).

Los resultados del estudio de agotamiento a volumen constante para la muestra de gas condensado se ilustran en la tabla 26. Nótese que la composición listada en la columna correspondiente a la presión 5377,7 lpca, es la composición del fluido de yacimiento en el punto de rocío y existe en el yacimiento en estado gaseoso. La tabla 26 y la figura 145 muestran el cambio en la composición del gas producido durante el agotamiento. Nótese la progresiva reducción de la fracción C<sub>6+</sub> por debajo del punto de rocío a medida que la presión cae hasta 2997 lpca, para luego incrementar al tiempo que esta se revaporiza a las presiones más bajas. Por su parte la fracción metano se incrementa por debajo del punto de rocío.

El factor de compresibilidad del gas ( $Z_{gc}$ ) se determinó a través de la correlación de Dranchuck y Abou-Kassem (véase Apéndice A), mientras que el factor de compresibilidad bifásico ( $Z_{2f}$ ) se calculó utilizando la Ec. 15 (véase Propiedades de los hidrocarburos en Capítulo II).

Tabla 26. Análisis composicional del gas producido en la prueba de agotamiento a volumen constante a 289,9 °F.

Composición de los fluidos producidos – Porcentaje Molecular										
Presión de Yacimiento – lpca										
Etapa	5377,7	4530	4003	3508	2997	2499	1999	1501	1117	1117
Nitrógeno	1,65	2,16	2,17	2,19	2,18	2,16	2,17	2,17	2,18	1,28
Metano	52,55	55,65	56,23	57,30	57,06	57,00	57,13	57,70	57,10	39,1
CO <sub>2</sub>	15,41	16,08	16,30	16,31	16,46	16,19	16,45	16,27	16,01	15,0
Etano	10,75	11,31	11,32	11,21	11,36	11,15	11,23	11,31	11,55	11,4
Propano	6,82	7,08	6,91	6,67	6,67	6,63	6,70	6,66	6,99	10,1
i-Butanos	1,18	1,21	1,15	1,11	1,09	1,13	1,09	1,06	1,14	2,10
n-Butanos	2,33	2,35	2,21	2,08	2,07	2,18	2,06	1,99	2,15	5,30
i-Pentanos	0,67	0,69	0,62	0,56	0,56	0,62	0,56	0,52	0,57	1,61
n-Pentanos	0,77	0,74	0,66	0,58	0,59	0,64	0,59	0,53	0,57	2,29
Hexanos+	2,99	2,72	2,42	1,99	1,95	2,30	2,03	1,79	1,96	11,8
Z <sub>gc</sub>	1,491	0,920	0,887	0,873	0,853	0,838	0,856	0,881	0,999	
Z <sub>2f</sub>	1,491	0,956	0,876	0,830	0,794	0,732	0,700	0,653	0,643	
SL %	0,0	17,60	17,70	17,74	17,21	16,58	15,82	15,10	11,24	

#### Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados

Además de la composición del gas producido en la etapa final de agotamiento de presión, la composición del líquido retrógrado también fue determinada. La composición del líquido es reportada en la última columna de la tabla 26 a 1117 lpca.

Por otra parte, el volumen de líquido retrógrado medido durante el curso del estudio de agotamiento es mostrado en la tabla 26 como porcentaje v/v. Las mediciones indican que la máxima acumulación de líquido de 17,74% ocurrió a 3508 lpca.

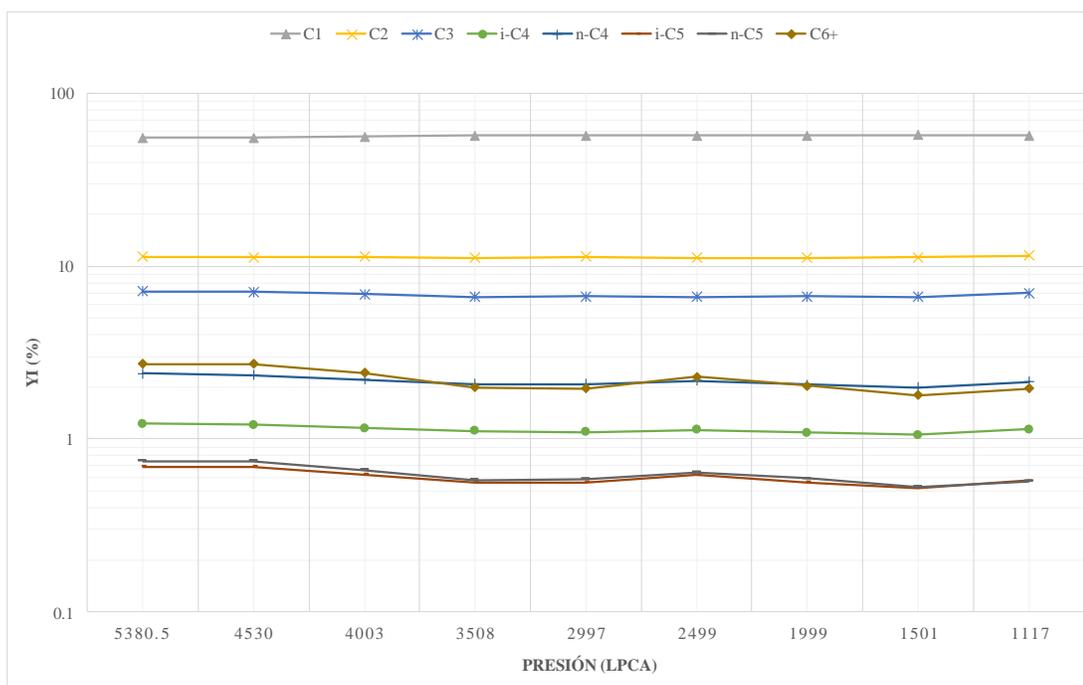


Figura 145. Variación de la composición del gas retirado, (producido) con presión.

Finalmente, como parte de los resultados de la prueba CVD ejecutada sobre la muestra de gas condensado, el programa PVT 3000 arrojó un monitoreo parcial del comportamiento PVT vs tiempo durante la ejecución por etapas de este estudio (véase figura 146).

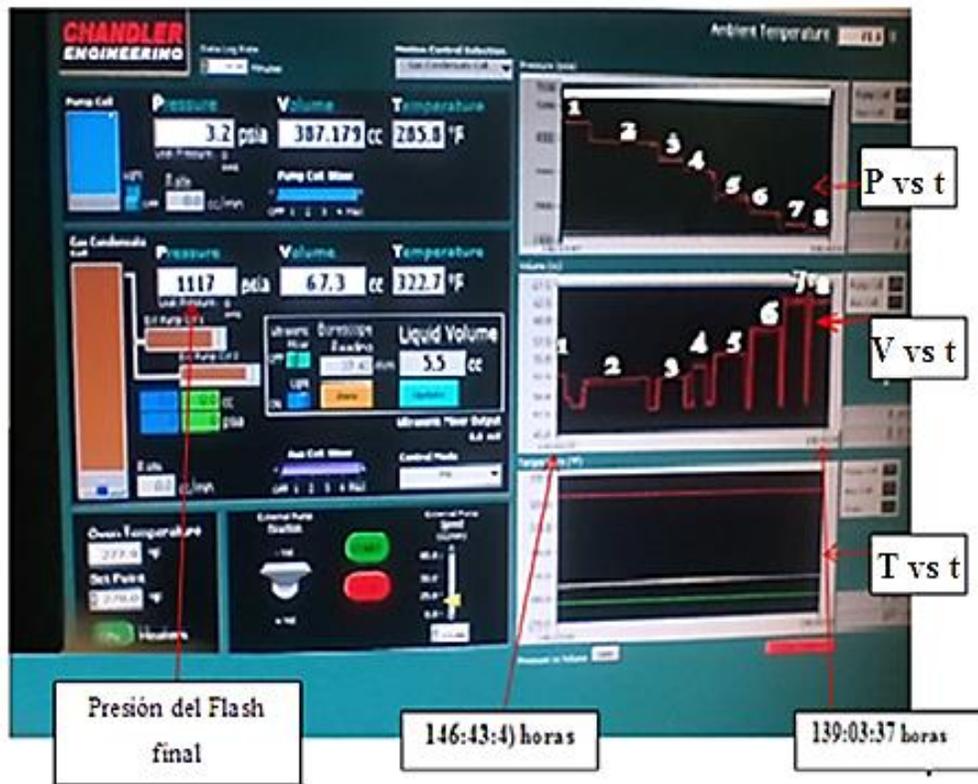


Figura 146. Comportamiento de la presión, volumen y temperatura durante de la ejecución de la prueba CVD (programa PVT 3000).

En la figura se puede apreciar el comportamiento de la gráfica presión (P) versus tiempo (t) en horas; para esta prueba existen 7 etapas de agotamientos de presiones en las cuales la línea horizontal de cada etapa representa el tiempo de estabilización por nivel de agotamiento, siendo en este caso la segunda etapa la que duro más tiempo en estabilizar. La última etapa se alcanzó a 1117 lpca. La presión que tardó más tiempo en estabilizar fue la de la segunda etapa.

En la gráfica de volumen (V) versus tiempo (t) de esta misma figura, se observa como a medida que se llevaba a cabo cada agotamiento de presión el volumen de la muestra en la celda disminuye (este proceso está representado por la línea vertical que cae en el gráfico) durante el proceso de drenado al vial que se encuentra a condiciones atmosféricas, y luego de alcanzar el volumen de referencia este se

estabiliza. Se puede notar en este gráfico que el volumen que tardó más tiempo en estabilizar fue el de la segunda etapa.

La última gráfica corresponde a la relación temperatura versus tiempo; como se puede observar permaneció estable ya que la temperatura en el horno fue constante durante el curso del estudio, el cual tuvo una extensión de aproximadamente 7 horas con 40 minutos, como lo indica la escala de tiempo del programa.

### Consistencia de las pruebas PVT

#### 1. Balance molar

Al realizar el balance molar para cada componente (véase balance molar en Capítulo II), es posible identificar si la prueba CVD es válida, o contiene algún tipo de errores, aplicando los criterios de validación de dicho experimento. A continuación en la tabla 27 se muestran los resultados de este paso para la muestra de gas condensado.

Tabla 27. Datos preliminares usados en el balance molar.

Temperatura del Yacimiento 749,9 R									
P (lpca)	% V (SL)	Gas producido acumulado Ngc %	Zg adim	Gas producido por fase $\Delta$ Ngc %	$\Delta$ Ngc lbmol	VI condensado pie <sup>3</sup>	Vgc gas pie <sup>3</sup>	Ngc gas lbmol	NI liquido lbmol
<b>5380,5</b>	0,0	0,00	1,05	0,00	0,000	0,0000	1,0000	0,6368	0,0000
<b>4530</b>	17,6	8,34	0,92	8,34	0,053	0,1760	0,8240	0,5042	0,0811
<b>4003</b>	17,7	14,91	0,887	6,57	0,042	0,1770	0,8230	0,4616	0,0818
<b>3508</b>	17,74	22,84	0,873	7,93	0,051	0,1774	0,8226	0,4108	0,0819
<b>2997</b>	17,21	32,35	0,853	9,51	0,061	0,1721	0,8279	0,3615	0,0705
<b>2499</b>	16,58	41,46	0,838	9,11	0,058	0,1658	0,8342	0,3092	0,0647
<b>1999</b>	15,82	51,64	0,856	10,18	0,065	0,1582	0,8418	0,2443	0,0645
<b>1501</b>	15,1	62,53	0,881	10,89	0,070	0,1510	0,8490	0,1798	0,0595
<b>1117</b>	11,24	72,13	0,999	9,60	0,061	0,1124	0,8876	0,1233	0,0546

En esta tabla se puede apreciar que para una presión de 3508 lpca se originó el mayor % de líquido retrogrado el cual fue de 17,74%, en este nivel comienza la re vaporización de la fase líquida; así mismo para este mismo nivel de presión comienza

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados

un aumento del volumen de la fase gaseosa, se obtiene la mayor cantidad de moles de la fase líquida la cual fue de 0,0819 lbmol para esta misma etapa.

También se puede apreciar que a la presión de 1501 lpca se obtuvo el mayor % de moles retirados de mezcla de gas condensado de la celda PVT; el cual fue de 10,89%.

En la tabla 28 se presentan las composiciones molares del líquido condensado, calculadas a partir de la ecuación 42 para cada etapa de agotamiento de presión de la prueba CVD.

Tabla 28. Composición molar del líquido condensado (Xi) para la muestra de gas condensado.

Composición de los fluidos condensados – Porcentaje Molecular								
Presión de Yacimiento - lpca								
Etapa	4530	4003	3508	2997	2499	1999	1501	1117
Nitrógeno	1,69	1,61	1,52	1,47	1,52	1,49	1,41	1,31
Metano	54,10	50,55	44,53	43,94	43,08	42,43	38,80	39,14
CO <sub>2</sub>	16,32	14,99	14,93	13,77	15,09	13,83	14,37	15,08
Etano	11,77	11,68	12,31	11,62	12,81	12,43	12,20	11,45
Propano	7,85	8,94	10,26	10,82	11,43	11,11	11,65	10,99
i-Butanos	1,34	1,70	1,93	2,16	2,06	2,25	2,47	2,35
n-Butanos	2,74	3,58	4,32	4,72	4,35	4,93	5,47	5,25
i-Pentanos	0,69	1,12	1,47	1,61	1,37	1,66	1,92	1,87
n-Pentanos	0,74	1,23	1,69	1,83	1,64	1,89	2,25	2,26
Hexanos+	2,76	4,61	7,04	8,07	6,65	7,97	9,46	9,59
Σ	100	100	100	100	100	100	100	100

Finalmente, las constantes de equilibrio calculadas a partir de la ecuación 43 para cada etapa de agotamiento de presión de la prueba CVD se presentan en la tabla 29.

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados

Tabla 29. Constantes de equilibrio (Ki) por etapa de agotamiento.

Etapa	Presión de Yacimiento - lpc							
	4530	4003	3508	2997	2499	1999	1501	1117
Nitrógeno	1,28	1,35	1,41	1,49	1,42	1,45	1,53	1,66
Metano	1,03	1,11	1,29	1,30	1,32	1,35	1,49	1,46
CO <sub>2</sub>	0,99	1,09	1,09	1,20	1,07	1,19	1,13	1,06
Etano	0,96	0,97	0,91	0,98	0,87	0,90	0,93	1,01
Propano	0,90	0,77	0,65	0,62	0,58	0,60	0,57	0,64
i-Butanos	0,91	0,68	0,57	0,51	0,55	0,48	0,43	0,48
n-Butanos	0,86	0,62	0,48	0,44	0,50	0,42	0,36	0,41
i-Pentanos	1,00	0,55	0,38	0,35	0,45	0,34	0,27	0,31
n-Pentanos	1,01	0,54	0,34	0,32	0,39	0,31	0,24	0,25
Hexanos+	0,99	0,52	0,28	0,24	0,35	0,25	0,19	0,20

2. Criterio de Hoffman, Crump y Hoccott

La figura 147 muestra las curvas del gráfico de Hoffman-Crump para los diferentes niveles de agotamiento de presión de la prueba CVD.

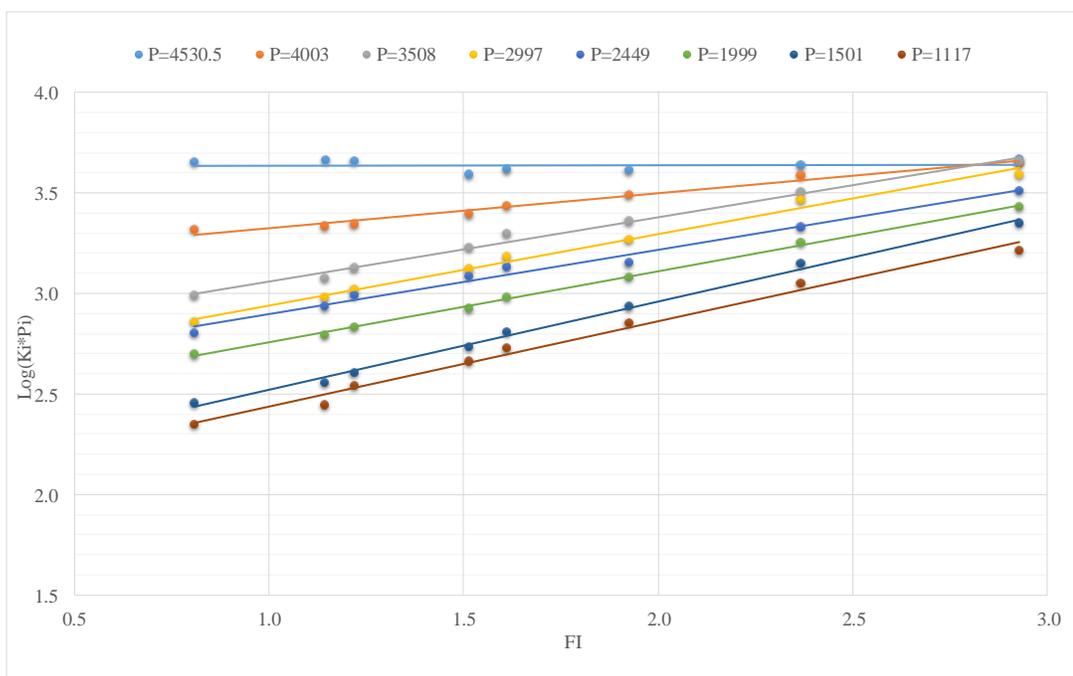


Figura 147. Criterio de Hoffman-Crump para la validación de las constantes de equilibrio (Ki), solo los componentes hidrocarburos, gas condensado WD.

Como se puede observar en la figura, todas las líneas del gráfico se ajustan a una tendencia lineal, no existen cruces entre líneas, las cuales convergen en un mismo punto de equilibrio; también es posible apreciar como el metano ( $C_1$ ) representa el compuesto hidrocarburo más ligero y abundante en la mezcla para cada condición de agotamiento de presión (punto más elevado de cada línea) mientras que el punto más bajo de cada línea representa al compuesto más pesado de la mezcla  $C_{6+}$ .

### **Comparación de las propiedades de fluidos de yacimientos generadas mediante simulación y las obtenidas por el Sistema Chandler PVT 3000**

En la tabla 30, se presentan los resultados obtenidos de la simulación de los parámetros PVT para la muestra de gas condensado. En segundo lugar se presenta el análisis de estos resultados.

Para obtener los cálculos teóricos de las propiedades termodinámicas, se utilizó la versión 20 del simulador PVTsim, el cual emplea en sus cálculos nueve ecuaciones de estado las cuales son: SRK (ec.1), SRK-Peneloux (ec.2), SRK-Peneloux (T) (ec.3), PR (ec.4), PR-Peneloux (ec.5), PR-Peneloux (T) (ec.6), PR78 (ec.7), PR78-Peneloux (ec.8), PR78-Peneloux (T) (ec.9).

Capítulo IV. Análisis y discusión de los resultados

Tabla 30. Resultados de la simulación de la muestra de gas condensado.

PRUEBA EXPERIMENTAL										
Psat										5377,7
RGL										10609
°API										41
βg										0,004

PRUEBA SIMULADA EN PVTsim (Caracterizado)									
Propiedad	Ec. 1	Ec. 2	Ec. 3	Ec. 4	Ec. 5	Ec. 6	Ec. 7	Ec. 8	Ec. 9
Psat	4714,7	4714,7	4714,7	4363,6	4363,6	4363,6	4579	4579	4579
RGL	9783	10976	10976	11025	11044	11044	11041	11061	11061
°API	61,0	40,1	40,1	40,4	40,2	40,2	40,1	39,9	39,9
βg	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005

% ERROR ABSOLUTO									
Propiedad	Ec. 1	Ec. 2	Ec. 3	Ec. 4	Ec. 5	Ec. 6	Ec. 7	Ec. 8	Ec. 9
Psat	12,33	12,33	12,33	18,86	18,86	18,86	14,85	14,85	14,85
RGL	7,79	3,45	3,45	3,92	4,10	4,10	4,08	4,26	4,26
°API	48,86	2,20	2,20	1,37	2,01	2,01	2,15	2,80	2,80
βg	25	25	25	25	25	25	0	25	25
SUMATORIA	93,98	42,98	42,98	49,15	49,97	49,97	21,08	46,91	46,91

Al ejecutar el PVTsim y aplicar cada una de sus ecuaciones de estado a la composición total del fluido se comparó la información teórica obtenida de dicho programa con la experimental, comparando los parámetros: (a) presión de saturación (Psat), (b) relación gas-liquido (RGL), (c) gravedad API, y (d) factor volumétrico de formación del gas (βg).

Para comprobar la aplicabilidad del programa de cálculo (PVTsim) de propiedades PVT, se estimó un nivel de aceptación de error macro de 25% en la sumatoria de los cuatro parámetros PVT estudiados. El porcentaje de error fue calculado a través de la siguiente expresión:

$$\%Error = \frac{100 * |Valor_{experimental} - Valor_{teórico}|}{Valor_{experimental}} \quad \text{Ec. 95}$$

También debe apuntarse que la muestra fue caracterizada experimentalmente, es decir que se le introdujo las propiedades de la fracción pesada C<sub>20+</sub> (densidad y peso molecular) calculadas de la liberación *flash*.

Como se observa en la tabla de resultados, la ecuación que mejor cotejó los parámetros estudiados ( $P_{sat}$ , RGL, °API,  $\beta_g$ ) de la muestra fue la ecuación PR78 (ec.7). Por su parte, la ecuación SRK (ec.1) presentó el mayor porcentaje de error absoluto.

Finalmente, en la figura 148 se muestra la envolvente de fases de la muestra de gas condensado, generada a través del programa PVTsim y la ecuación PR78. De acuerdo con los criterios de clasificación de los fluidos del yacimiento, explicados detalladamente en el Capítulo II, la estructura que presenta la envolvente de fases es indicativa de un fluido tipo gas condensado. En efecto, se puede observar que la temperatura del yacimiento se encuentra comprendida entre las temperaturas crítica y cricridentérmica de la mezcla de hidrocarburos.

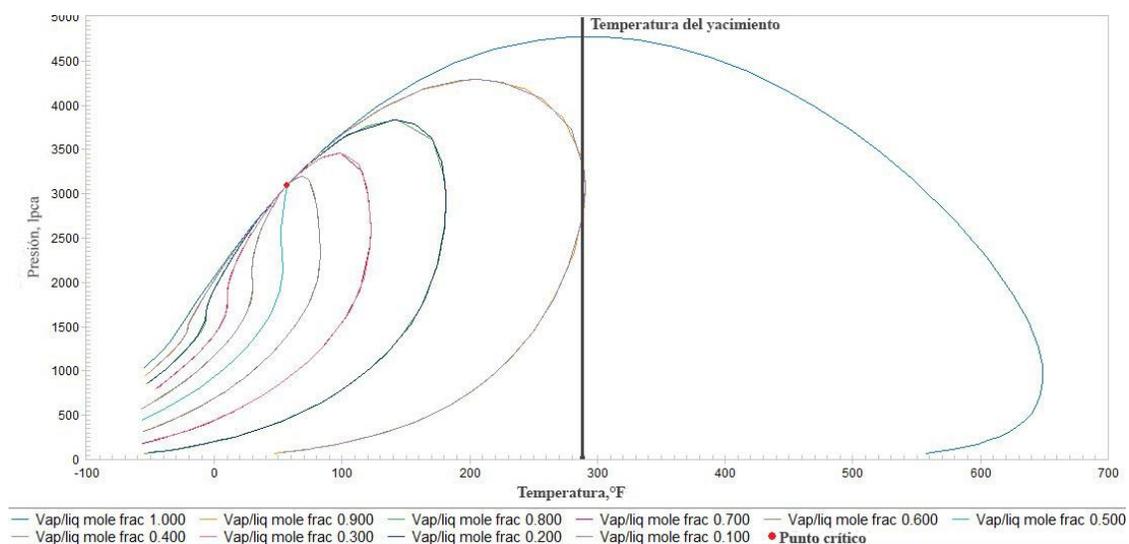


Figura 148. Diagrama de fases para la muestra de gas condensado.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Lo expuesto a lo largo de esta investigación permite arribar a las siguientes conclusiones y recomendaciones en relación a los objetivos planteados.

#### **Conclusiones**

1. El manual de usuarios del sistema Chandler PVT 3000 es una guía óptima para la instalación de los componentes del equipo y conocer sus características. Sin embargo, presenta una escasa descripción de las instrucciones de trabajo para la ejecución de las pruebas. En tal sentido esta investigación formula una serie de instrucciones de trabajo para el desarrollo de pruebas convencionales en el equipo, cualquiera sea la naturaleza de la muestra en estudio, gas condensado, petróleo negro o petróleo volátil.
2. Los componentes del sistema PVT fueron revisados exhaustivamente y en caso de presentar problemas de funcionamiento fueron reacondicionados para su posterior aplicación, por lo que puede decirse que actualmente se encuentran en buenas condiciones para operar con la celda auxiliar.
3. El sistema Chandler PVT 3000 fue reacondicionado y calibrado satisfactoriamente y este actualmente se encuentra funcionando correctamente en lo que respecta a la celda auxiliar.
4. El fluido en estudio cumple con las características de un fluido tipo gas condensado, el contenido de la fracción C<sub>7+</sub> fue de 4,88%, la RGL obtenida fue de 10600 PCN/BN.

5. La presión de rocío determinada visualmente fue de 5377,7 lpca y durante la ejecución de la prueba CCE fue posible determinar la formación de líquido retrogrado, cuyo valor máximo fue 11,23 % v/v a la presión de 2452,2 lpca. Asimismo, la diferencia entre la presión de rocío determinada por el método de la función  $Y_{EXT}$  y el método de observación fue menor que 2% para la muestra de gas condensado estudiada.
6. De la prueba de agotamiento a volumen constante se determinó la variación en la composición del gas producido con presión. Es así como se observó que el pseudo-componente  $C_{6+}$  se empobreció por efecto del proceso de condensación retrograda, al pasar de un 2,73% en la etapa inicial de 5380,5 lpca a un 1,95% en la etapa correspondiente a 2997 lpca, para posteriormente incrementar ligeramente hasta alcanzar un 1,96% a la presión de abandono de 1117 lpca por efecto de la revaporización del condensado retrogrado. Por su parte, el metano se enriqueció al pasar de 55,61% en la etapa de referencia a un 57,19 % para la etapa de abandono.
7. Se determinó que el estudio PVT realizado a la muestra de gas condensado fue consistente según lo especificado por el balance molar y criterio de Hoffman.
8. La muestra en estudio fue caracterizada por el simulador PVTsim. Según el criterio evaluado de un error menor que 25% en la sumatoria de los cuatro parámetros estudiados ( $P_{sat}$ ,  $RGL$ ,  $^{\circ}API$ ,  $\beta_g$ ), la muestra fue cotejada por la ecuación de estado PR-78 (ec.62). Las demás ecuaciones presentaron errores elevados que van desde 42,98% hasta 93,98%.
9. La envolvente termodinámica obtenida mediante las simulaciones composicionales en el programa PVTsim, coincide con el diagrama de fases característico de un yacimiento de gas condensado.

### **Recomendaciones**

1. Adquirir un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS) de 110v que permita proteger los componentes del panel de control en caso de presentarse interrupciones en el suministro de energía eléctrica.
2. Adquirir un accesorio en forma de T de 1/4" OD que soporte altas presiones de manera que sea posible conectar los cilindros de la bomba en serie y así suministrar una salida de fluido constante.
3. Adquirir cromatógrafos con los detectores adecuados que permitan a la Escuela de Petróleo completar el proceso de análisis composicional del fluido.
4. Para el caso de preparación y ejecución de pruebas convencionales en el equipo, se recomienda al operador adoptar las instrucciones de trabajo que aporta esta investigación.
5. Durante el calentamiento de la muestra se recomienda al operador verificar que la válvula de entrega de la bomba se encuentre abierta, ya que al expandirse la muestra la presión aumenta súbitamente, pudiendo ocasionar daños en el equipo.
6. Se recomienda realizar una prueba de fugas a las líneas después de concluido un estudio PVT, ya que se trabaja con presiones elevadas que en algunas circunstancias pueden sobrepasar las 10000 lpca.
7. Se recomienda desarrollar un programa computacional para el procesamiento de los datos experimentales, y presentación de los resultados en tablas y gráficos.
8. Se recomienda revisar el funcionamiento del motor para la presurización de la celda bomba, ya que esta presentó problemas relacionados con el desplazamiento del pistón.

## LISTA DE REFERENCIAS

- Ahmed, T. (2001). *Reservoir Engineering Handbook* (2 ed.). Houston, Texas: Gulf Professional Publishing.
- Bahadori, A. (2016). *Fluid Phase Behavior for Conventional and Unconventional Oil and Gas Reservoirs*. Amsterdam, The Netherlands: Gulf Professional Publishing.
- Camacho, M. (2011). Estudio del efecto de la inyección de nitrógeno y dióxido de carbono sobre la composición y las propiedades volumétricas de un gas condensado. *Trabajo Especial de Grado*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Chandler, E. (2008). *PumpWorks User's Manual (Vol. 6.10)*. Tulsa, Oklahoma: Quizix.
- Chandler, E. (2009). *Instruction Manual for Model 2353-805 Equilibrium Flash Separator*. Broken Arrow, Oklahoma.
- Chandler, E. (2009). *Instruction Manual for Model 3000-G/L, -G, and-L PVT System*. Broken Arrow, Oklahoma.
- Chandler, E. (2010). *Instrucción Manual Sample Bottle*. Tulsa, Oklahoma.
- Chandler, E. (2014). *Instruction Manual Model 2331D Gasometer*. Broken Arrow, Oklahoma.
- Dake, L. (1978). *Fundamentals of Reservoir Engineering*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Danesh, A. (1998). *PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids* (2 ed.). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Dávila, T. (2015). Metodología para la Validación de Pruebas PVT Composicional en Yacimientos de Gas Condensado. *Trabajo Especial de Grado*. Universidad del Zulia, Maracaibo.
- De Ferrer, M. (2009). *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos*. Maracaibo, Venezuela: Astro Data.
- Eyton, D.G.P. (1987). *Practical Limitations in Obtaining PVT Data for Gas Condensate Systems*. SPE 15765. Manama, Bahrain.

- Gimenez, J., y Salas, O. (2007). *Efecto de la Variación de los Parámetros Característicos del Componente C20+ Sobre Algunas Propiedades PVT*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Hernandez, R., Fernandez, C., y Baptista, P. (2004). *Metodología de la Investigación* (Tercera ed.). Toluca, Mexico: McGraw-Hill .
- Hosein, R., Mayrhoo, R., y McCain, W. (2014). *Determination of Bubble-Point and Dew-Point Pressure Without a Visual Cell*. SPE 169947-MS. Puerto España, Trinidad.
- Lawrence, J., Chorneyko, D., Smith, C., y Nagarajan, N. (2008). *Representative Reservoir Fluid Sample: Challenges, Issues and Solutions*. Kuala Lumpur: IPTC.
- McCain, W. (1990). *The Properties of Petroleum Fluids* (2 ed.). Tulsa, Oklahoma: Penn Well Books.
- Miller, J. (1988). *Chromatography: Concepts and Contrasts*. New York: John Wiley & Sons.
- Ovando, M. (2012). *Cracterización de asfaltenos* (2 ed.). Bucaramanga, Santander: C.T.F Cienc. Tecnol publicaciones.
- Pedersen, K., y Christensen, P. (2007). *Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids* (2 ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Pedersen, K., Fredenslund, A., y Thomassen, P. (1989). *Properties of Oils and Natural Gases*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Peralta, Y. (2003). *Validación de Datos Experimentales PVT con Fluidos de Yacimientos con Estudios de Asfaltenos del Oriente (Norte de Monagas) y Occidente de Venezuela Utilizando el Simulador Composicional PVTsim. Trabajo Especial de Grado*. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Ramírez, J. (2015). *Análisis y Evaluación de las Pruebas PVT. Informe final del laboratorio de fluido*. Uuniversidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Rojas, G. (2003). *Ingeniería de Yacimientos de Gas Condensado*. Puerto La Cruz, Venezuela.
- Systems, P. (2004). *Cryette WR Model 5009 Wide Range Cryoscope Instruction Manual*. Natick, Massachusetts.
- Whitson, C., y Brulé, M. (2000). *Phase Behavior. Monografía*. Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas.

## APÉNDICES

### APÉNDICE A. CORRELACIÓN DE DRANCHUCK Y ABOU-KASSEM

Dranchuk y Abou-Kassem derivaron en 1975 una expresión analítica para el cálculo de la densidad del gas reducida que puede ser usada para estimar el factor de compresibilidad del gas (Ahmed, 2001):

$$\rho_r = \frac{0,27P_{sr}}{zT_{sr}} \quad \text{A.1}$$

Los autores propusieron la siguiente ecuación de estado de once constantes para calcular la densidad del gas reducida:

$$f(\rho_r) = (R_1)\rho_r - \frac{R_2}{\rho_r} + (R_3)\rho_r^2 - (R_4)\rho_r^5 + (R_5)(1 + A_{11}\rho_r^2)\rho_r^2 \exp[-A_{11}\rho_r^2] + 1 = 0 \quad \text{A.2}$$

Con los coeficientes  $R_1$  a  $R_5$  definidos por las siguientes relaciones:

$$R_1 = A_1 + \frac{A_2}{T_{sr}} + \frac{A_3}{T_{sr}^3} + \frac{A_4}{T_{sr}^4} + \frac{A_5}{T_{sr}^5}$$

$$R_2 = \frac{0,27P_{sr}}{T_{sr}}$$

$$R_3 = A_6 + \frac{A_7}{T_{sr}} + \frac{A_8}{T_{sr}^2}$$

$$R_4 = A_9 \left[ \frac{A_7}{T_{sr}} + \frac{A_8}{T_{sr}^2} \right]$$

$$R_5 = \left[ \frac{A_{10}}{T_{sr}^3} \right]$$

Los valores de las constantes  $A_i$  son:

$A_1 = 0,3265$	$A_4 = 0,01569$	$A_7 = -0,7361$	$A_{10} = 0,6134$
$A_2 = -1,0700$	$A_5 = -0,05165$	$A_8 = 0,1844$	$A_{11} = 0,7210$
$A_3 = -0,5339$	$A_6 = 0,5475$	$A_9 = 0,1056$	

La ecuación A.2 puede ser resuelta para la densidad del gas reducida  $\rho_r$  aplicando la técnica de iteración de Newton-Raphson, como se resume en los siguientes pasos:

1. Hacer una suposición inicial del parámetro desconocido,  $\rho_r^k$ , donde  $k$  es un contador de iteración. Una suposición inicial apropiada de  $\rho_r^k$  esta dada por la siguiente relación:

$$\rho_r = \frac{0,27P_{sr}}{T_{sr}}$$

2. Sustituir este valor inicial en la ecuación A.2 y evaluar la función no-lineal. A menos que el valor correcto de  $\rho_r^k$  haya sido seleccionado inicialmente, la ecuación A.2 tendrá un valor distinto de cero para la función  $f(\rho_r^k)$ .
3. Un nuevo estimado mejorado de  $\rho_r$ , dado por,  $\rho_r^{k+1}$ , es calculado de la siguiente expresión:

$$\rho_r^{k+1} = \rho_r^k - \frac{f(\rho_r^k)}{f'(\rho_r^k)}$$

donde

$$f'(\rho_r) = (R_1) + \frac{R_2}{\rho_r^2} + 2(R_3)\rho_r - 5(R_4)\rho_r^4 + 2(R_5)\rho_r \exp[-A_{11}\rho_r^2][(1 + 2A_{11}\rho_r^3) - A_{11}\rho_r^2(1 + A_{11}\rho_r^2)]$$

4. Los pasos 2 y 3 son repetidos  $n$  veces, hasta que el error, es decir,  $\text{abs}(\rho_r^k - \rho_r^{k+1})$ , se vuelva más pequeño que una tolerancia predeterminada, p. ej.,  $10^{-12}$ .
5. El valor correcto de  $\rho_r$  es entonces usado para evaluar la ecuación A.1 para el factor de compresibilidad:

$$Z = \frac{0,27P_{sr}}{\rho_r T_{sr}}$$

La correlación propuesta es aplicable para los rangos:

$$0,2 \leq P_{sr} < 30$$

$$1,0 < T_{sr} \leq 3,0$$

## **APÉNDICE B. INSTRUCCIONES DE TRABAJO PARA LA EJECUCIÓN DE ESTUDIOS PVT CONVENCIONALES EN MUESTRAS DE PETRÓLEO NEGRO Y/O VOLÁTIL EN EL SISTEMA CHANDLER PVT 3000.**

Este apéndice presentan las instrucciones de trabajo requeridas para el desarrollo de estudios PVT en el sistema Chandler PVT 3000 de *Chandler Engineering*, considerando muestras de fluidos tomadas de yacimientos de petróleo negro y petróleo volátil. También, el procedimiento alternativo para la inyección de este tipo de muestras es descrito. La nomenclatura para las válvulas usada aquí es consistente con la nomenclatura usada en el resto del trabajo de investigación.

### **B.1 INYECCIÓN DE LA MUESTRA**

Los equipos y materiales utilizados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT 3000.
- Bomba Quizix.
- Cilindro portamuestra.
- Líneas y conexiones.

En la figura B.1 presenta el diagrama de los equipos utilizados en la inyección.

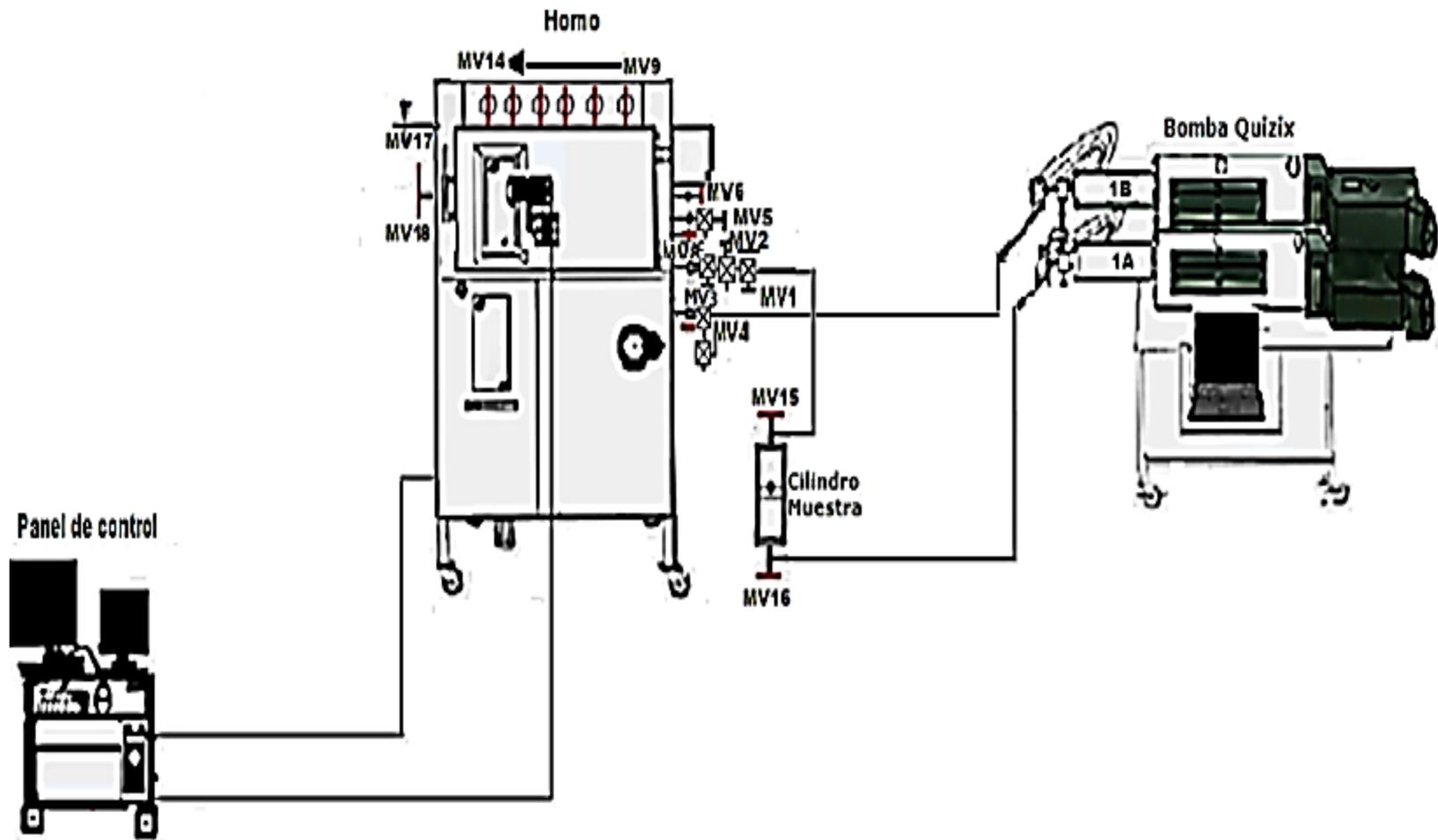


Figura B.1. Esquema de los equipos de laboratorio para la inyección de la muestra.

El procedimiento operacional es como sigue:

- i. Conectar la válvula de seguridad tipo L (MV17) en el puerto *PUMP CELL BYPASS IN/OUT*.
- ii. Conectar el juego de válvulas de seguridad (MV1, MV2, MV3) en el puerto *PUMP CELL CHARGE IN/OUT*.
- iii. Conectar el extremo de muestra del cilindro portamuestra (MV15) con las válvulas de seguridad (MV1) del puerto *PUMP CELL CHARGE IN/OUT* mediante una línea de alta presión con conexión *straight* hembra en MV1 y conexión HIP para el cilindro.
- iv. Fijar la temperatura del sistema a la temperatura de trabajo en el panel de control de temperatura.
- v. Esperar 15 minutos para que se caliente la celda a partir del momento que la temperatura indicada en el panel sea aproximada a la temperatura de trabajo y ésta se mantenga estable.
- vi. Llevar la celda bomba a volumen mínimo mediante la manipulación del panel de control.
- vii. Abrir la válvula *PUMP CELL BYPASS VALVE* (MV18) y la válvula MV17, de manera que la celda bomba se encuentre a presión atmosférica.
- viii. Calibrar el transductor de presión de la celda bomba (véase procedimiento técnico: Calibración del transductor de presión).  
**Nota:** en el primer paso del procedimiento seleccionar el menú desplegable *Calibration...Pump Cell... Pressure transducer calibration*.
- ix. Abrir las válvulas *PUMP CELL ISOLATION VALVE* (MV14), *PUMP CELL CHARGE VALVE* (MV13), válvulas de seguridad (MV1, MV2, MV3).
- x. Realizar vacío a la celda bomba y a todas las tuberías conectadas a ella, aproximadamente por 20 minutos. Para ello, conectar una manguera de vacío a la válvula de tres vías MV2. Al finalizar la succión cerrar las válvulas en el siguiente orden: MV18, MV14, MV13, MV10, MV1, MV2, y MV3. Apagar

la bomba de vacío y retirar la manguera. También cerrar la válvula *MINI CELL CHARGE VALVE* (MV12), en caso de estar conectada.

- xi. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula del extremo de muestra del cilindro (MV15), (aproximadamente 1½ vuelta), y con la bomba externa 1A desplazar el fluido a presión constante hacia las válvulas de seguridad cerradas (MV1). Esperar a que establezca la presión, y verificar presencia de fuga.
- xii. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV1, para llenar la tubería entre esta y la válvula MV3.

**Nota:** si el fluido es recombinado o de fondo es necesario conocer aproximadamente su presión de burbuja para que al abrir las válvulas no caiga la presión por debajo de ésta y no se produzca una separación de fases. Si se trabaja con crudo muerto no es necesario trabajar lento, pues éste no contiene gas en solución.

- xiii. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV3, para llenar la tubería entre esta y la válvula MV13.
- xiv. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV13, para llenar la tubería entre esta y la válvula MV14.
- xv. Abrir lenta y cuidadosamente la válvula MV14 para inyectar el volumen mínimo de muestra de la celda.
- xvi. Configurar la celda bomba en modo presión constante, ingresar un *set point* de presión igual a la presión del cilindro portamuestra, y luego hacer clic en el botón *START* (véase figura B.2). Inyectar el volumen de muestra deseado hacia la celda bomba mientras esta mantiene la presión constante.



Figura B.2: Panel de control de la celda bomba.

- xvii. Al finalizar, cerrar la válvula PUMP CELL CHARGE VALVE (MV13).

## **B.2 PROCESO DE LIBERACIÓN INSTANTÁNEA EN UNA ETAPA**

Los equipos y materiales utilizados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT 3000.
- Gasómetro de doble celda. Modelo 2331d.
- Cilindro recolector de gas para análisis.
- Líneas y conexiones.
- Vial (que servirá como separador atmosférico).
- Balanza analítica.
- Bomba de vacío.
- Helio.
- Nitrógeno líquido.
- Compresor.

En la figura B.3 se presenta un diagrama del montaje experimental para llevar a cabo este proceso.

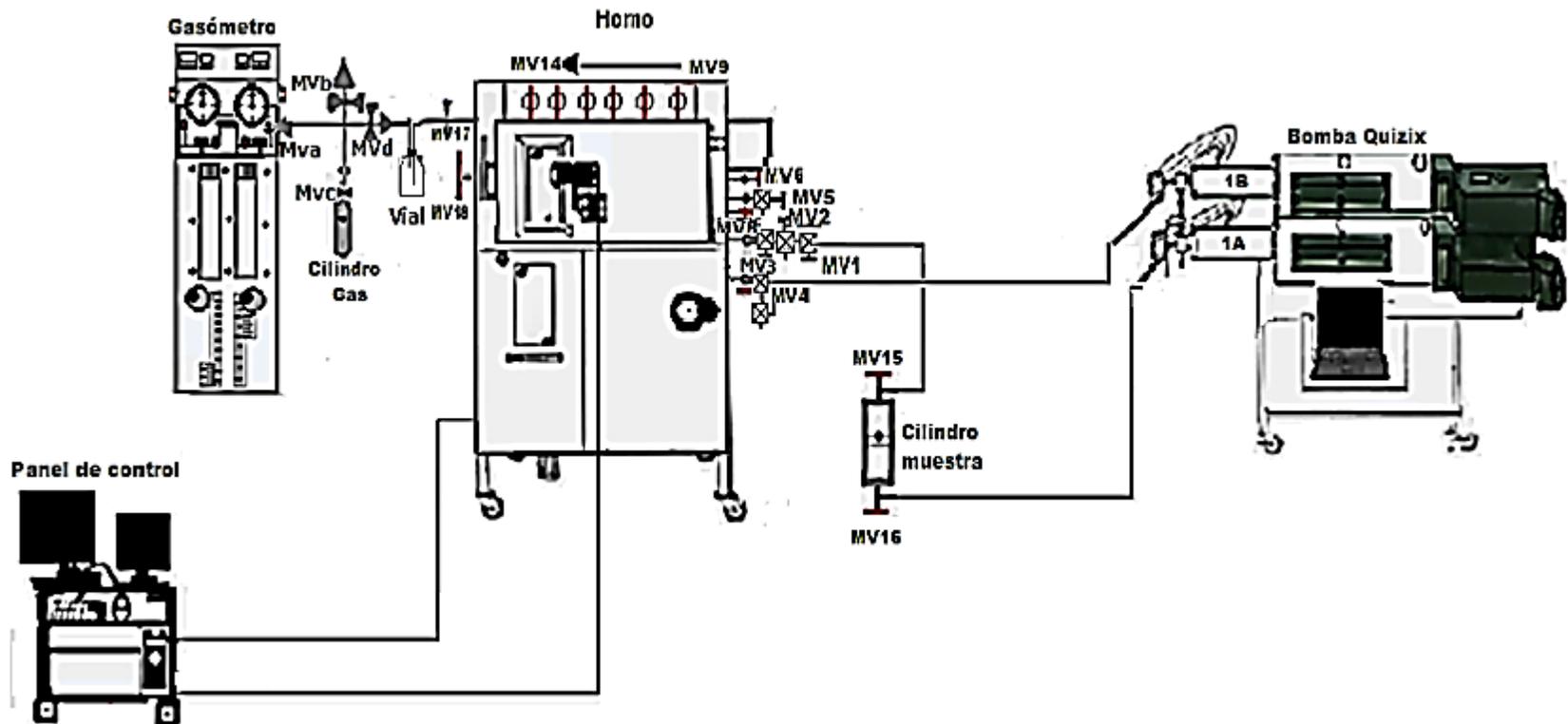


Figura B.3: Esquema de los equipos de laboratorio para la liberación instantánea.

El procedimiento experimental es el siguiente:

- i. Verificar que la muestra dentro de la celda PVT esté a condiciones monofásicas y a temperatura de yacimiento. Con este propósito, observar por el visor integrado en la celda bomba.
- ii. Conectar la válvula Ruska tipo L al puerto de salida *PUMP CELL BYPASS IN/OUT* (MV17).
- iii. Pesar un vial tapado, el cual es utilizado como un separador atmosférico para recolectar la muestra de líquido y seguidamente conectarlo a la aguja de salida del crudo.
- iv. Conectar desde el vial una línea flexible hasta la conexión tipo cruz que da acceso al gasómetro, y desde la parte inferior de la conexión tipo cruz, conectar un cilindro recolector de gas, el cual debe estar limpio y probado a fugas.
- v. Practicarle vacío al sistema conectado al equipo PVT (vial, cilindro recolector de gas, conexión tipo cruz, y línea) aproximadamente por 20 minutos. Para ello, verificar que la válvula de tres vías del gasómetro (MVa) esté cerrada. Luego, conectar una manguera de vacío en la parte superior de la conexión tipo cruz y verificar que las válvulas de paso a la bomba de vacío (MVb), al cilindro (MVc), y al vial (MVd) permanezcan abiertas durante la succión. Al terminar el vacío, cerrar únicamente las válvulas MVb y MVc y apagar la bomba de vacío.
- vi. Curar la cámara del gasómetro con helio. Para ello, abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de venteo y conectar la manguera de una bombona de helio en el puerto de venteo con un flujo de 500cc/min. Permitir que la cámara se llene con helio, luego retirar la manguera y drenar el helio hacia la atmosfera subiendo el pistón mediante la manipulación de la perilla del gasómetro. Repetir tres veces, dejando el helio en la cámara en el último llenado.

**Nota:** el procedimiento para curar la segunda cámara es idéntico.

- vii. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada del gasómetro y enviar helio al sistema (conexión tipo cruz, línea, y vial). Esto con el fin de mantener equilibrado el sistema y eliminar la presión negativa.
- viii. Asegurarse de que las cámaras del gasómetro indiquen volumen igual a cero cc. Para ello, se debe drenar el volumen en exceso de helio hacia la atmosfera a través del puerto de venteo. Con este propósito, abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de venteo, y subir el pistón hasta el tope de la cámara manipulando la perilla del gasómetro.
- ix. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada y ajustar la presión interna a la presión atmosférica manipulando la perilla del gasómetro.
- x. Realizar un purgue de líneas. Para ello, abrir lenta y cuidadosamente la válvula *PUMP CELL BYPASS VALVE* (MV18) y la válvula de seguridad del puerto *PUMP CELL BYPASS IN/OUT* (MV17), en ese orden, para drenar una alícuota de la muestra (aproximadamente 4 cc). Luego, cerrar la válvula de tres vías (MVa) para aislar la cámara del gasómetro y cerrar las válvulas MV11 y MV10, en ese orden.  
**Nota:** la apertura de la válvula debe ser de tal forma que el crudo sólo gotee.
- xi. Cambiar el vial por otro nuevo y practicarle vacío. Al finalizar, cerrar la válvula de paso a la bomba de vacío (MVb).
- xii. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada y enviar gas al sistema (conexión tipo cruz, línea, y vial). Esto con el fin de mantener equilibrado el sistema y eliminar la presión negativa.
- xiii. Anotar la lectura inicial de volumen indicado en el panel de control de la celda bomba.
- xiv. Desplazar un volumen apropiado de muestra al vial. Para ello, abrir lenta y cuidadosamente la válvula *PUMP CELL BYPASS VALVE* (MV18), y la válvula de seguridad del puerto *PUMP CELL BYPASS IN/OUT* (MV17), en ese orden. Observar la salida de crudo al vial.  
**Nota:** la apertura de la válvula debe ser de tal forma que el crudo sólo gotee.

- xv. Ajustar éste volumen mediante la abertura de la válvula de drenaje (MV17), y al obtener el volumen de referencia deseado, cerrar las válvulas MV17 y MV18.
- Nota:** el cierre de las válvulas debe ser sin exceso de fuerza para evitar daños en las roscas que las inhabiliten, y en el orden indicado.
- xvi. Medir y anotar el volumen acumulado de gas. Es de hacer notar que para obtener una lectura correcta del volumen de gas, se debe verificar que la presión en el manómetro sea igual a cero, de lo contrario ajustarla manipulando la perilla del gasómetro.
- xvii. Verificar que el volumen de líquido en el vial sea suficiente para realizar los análisis complementarios de densidad, peso molecular, y cromatografía. En caso contrario, drenar el volumen medido de gas hacia la atmosfera ajustando la válvula MVa hacia el puerto de venteo, y subiendo el pistón hasta el tope de la cámara manipulando la perilla; al finalizar ajustar la válvula MVa a la posición de entrada y repetir los pasos del xiv al xvi.
- xviii. Anotar la lectura final de volumen indicado en el panel de control de la celda bomba.
- xix. Abrir la válvula del cilindro recolector de gas (MVc), sumergido en nitrógeno líquido para bajar la temperatura del mismo y provocar el paso del gas, del gasómetro al cilindro por diferencia de presiones. Este proceso se realiza hasta que se agote el volumen de gas en el gasómetro; esto se puede observar por medio de la lectura del manómetro, el cual tenderá a una lectura negativa.
- Nota:** las salpicaduras de nitrógeno líquido producen quemaduras profundas y graves, por lo cual manipular con precaución y emplear guantes aislantes para bajas temperaturas, careta facial y bata.
- xx. Cerrar rápidamente la válvula de tres vías (MVa) para evitar daños en el manómetro.
- xxi. Cerrar la válvula del cilindro recolector de gas (MVc).
- xxii. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de venteo para que no quede tanto tiempo el manómetro en negativo y evitar daños.

- xxiii. Retirar el cilindro y colocar una etiqueta de identificación indicando: (a) nombre del pozo, (b) profundidad, (c) presión, (d) temperatura, y (e) fecha.
- xxiv. Retirar el vial de las agujas y pesarlo, luego se le coloca una etiqueta de identificación indicando: (a) nombre del pozo, (b) profundidad, (c) presión, (d) temperatura, y (e) fecha.
- xxv. Enviar la muestra de gas (cilindro recolector) y la muestra de líquido (vial) al laboratorio de análisis complementarios PVT para estudio composicional.

### B.3 PROCESO DE EXPANSIÓN A COMPOSICIÓN CONSTANTE (CCE)

Los equipos utilizados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT libre de mercurio modelo 3000.
- Bomba Quizix.

En la figura B.4 se presenta un diagrama del montaje experimental para llevar a cabo este proceso.

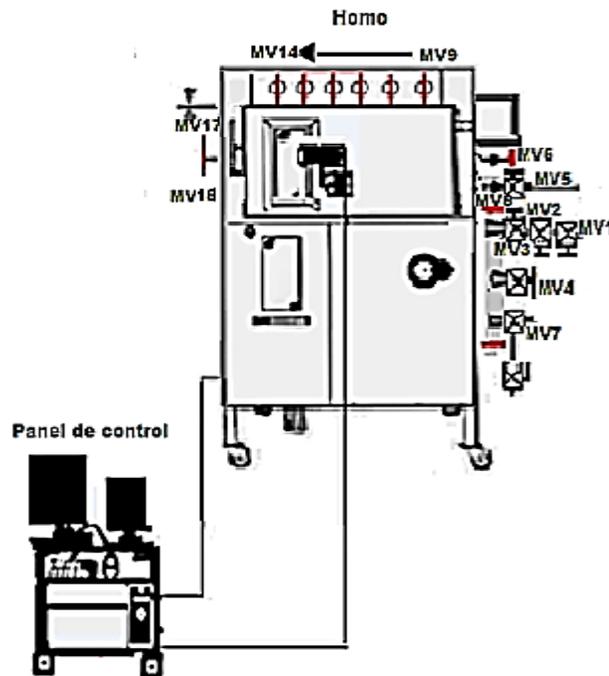


Figura B.4: Esquema de los equipos de laboratorio para el proceso CCE.

El procedimiento experimental es el siguiente:

- i. Verificar que la temperatura indicada en la celda bomba sea la especificada. En caso de que no lo sea introducirlo en el panel de control de temperatura.
- ii. Chequear que el agitador magnético esté encendido. En caso contrario, activarlo en el panel de control de la celda bomba.
- iii. Fijar el sistema a presión constante, superior a la presión de burbuja. Para ello, en el panel de control de la celda bomba hacer clic en el menú desplegable *Control mode...Constant pressure*. En la ventana emergente en la parte inferior de la pantalla, seleccionar un *set point* de presión adecuado y hacer clic en el botón *Start*.  
**Nota:** es importante estimar cuantos pasos se llevarán a cabo por encima del punto de burbuja a fin de establecer los intervalos de presión.
- iv. Esperar hasta que la muestra se estabilice, es decir, que la presión y el volumen que se muestran en pantalla no varíen. Observar por el visor la fase del fluido, ésta debe estar líquida.
- v. Registrar la presión y el volumen en el cuaderno de laboratorio.
- vi. Fijar una nueva presión menor que la anterior (véase paso iii).
- vii. Esperar el equilibrio entre la presión y el volumen. Registrar ambos datos en el cuaderno de laboratorio.
- viii. Repetir los pasos vi y vii hasta registrar de seis a ocho puntos por encima de la presión de burbuja.
- ix. Observar atentamente el visor de la celda a fin de contemplar el punto de burbuja (una fase líquida y un burbujeo de gas transparente en la parte superior). Registrar rápidamente la presión y el volumen observados en este punto.
- x. Configurar intervalos de presión más pequeños, aproximadamente ocho o más puntos a partir de la visualización del punto de burbuja.
- xi. Repetir los pasos vi y vii hasta alcanzar el último intervalo de presión predeterminado.

#### **B.4 PROCESO DE LIBERACIÓN DIFERENCIAL**

Los equipos utilizados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT libre de mercurio modelo 3000.
- Gasómetro de doble celda. Modelo 2331d.
- Bomba Quizix.
- Cilindro recolector de gas para análisis.
- Líneas y conexiones.
- Vial.
- Balanza analítica.
- Bomba de vacío.
- Helio.
- Nitrógeno líquido.
- Compresor.

La figura B.5 que se muestra a continuación presenta el diagrama de los equipos usados en este procedimiento.

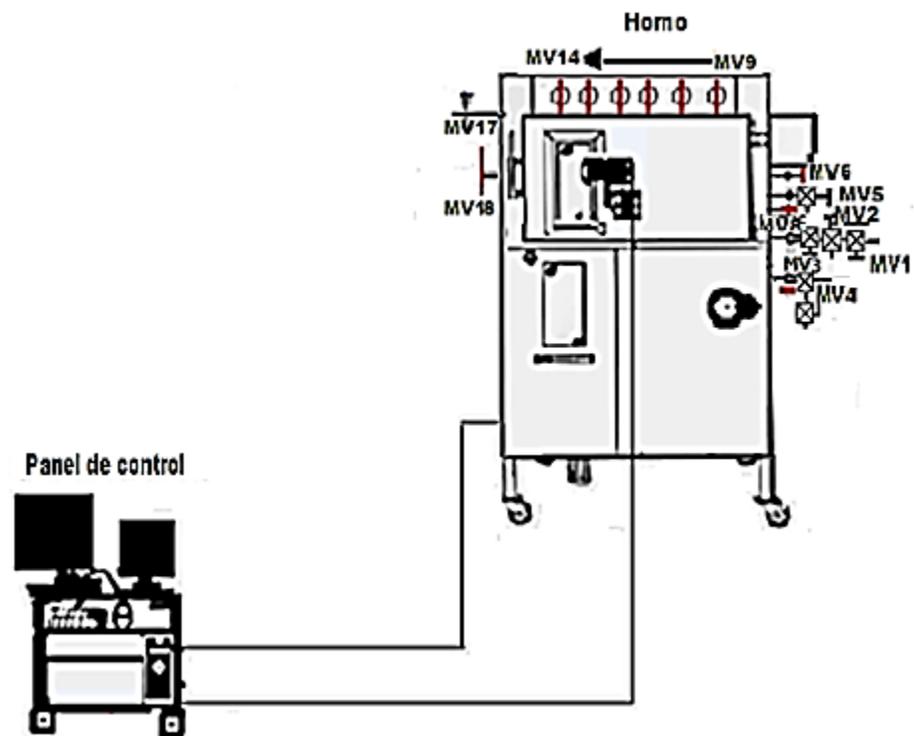


Figura B.5: Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba de liberación diferencial.

El procedimiento experimental es el siguiente:

- i. Chequear que la temperatura indicada en el panel de control de la celda bomba sea la especificada. En caso contrario, ajustar el *set point* de temperatura en el panel de control de temperatura en la pantalla principal.
- ii. Chequear que el agitador magnético de la celda bomba esté activado. En caso contrario activarlo en el panel de control de la celda bomba.
- iii. Presurizar la celda a una presión por encima de la presión de burbuja para restaurar la muestra a condiciones monofásicas. Para ello, en el panel de control de la celda bomba seleccionar *Control mode...Constant pressure*. Luego, en la ventana emergente en la parte inferior de la pantalla ingresar un *set point* de presión adecuado y presionar el botón *Start*.
- iv. Esperar hasta que la muestra se estabilice, es decir, que la presión y el volumen que se muestran en pantalla no varíen. Observar por el visor la fase del fluido, ésta debe estar líquida. Además, verificar que el volumen registrado en la prueba CCE para ésta etapa de presión coincida con el volumen indicado en el panel de control de la celda bomba.
- v. Pesar un vial tapado, el cual es utilizado como un separador atmosférico para recolectar la muestra de líquido y seguidamente conectarlo a la válvula Ruska tipo L (MV17)
- vi. Conectar desde el vial una línea flexible hasta la conexión tipo cruz que da acceso al gasómetro, y desde la parte inferior de la conexión tipo cruz, conectar un cilindro recolector de gas, el cual debe estar limpio y probado a fugas.
- vii. Practicarle vacío al sistema conectado al equipo PVT (vial, cilindro recolector de gas, conexión tipo cruz, y línea) aproximadamente por 20 minutos (véase procedimiento técnico: Liberación flash).
- viii. Curar las cámaras del gasómetro con helio (véase procedimiento técnico: Liberación flash).

- ix. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada del gasómetro y desplazar el helio al sistema (conexión tipo cruz, línea, y vial). Expulsar el helio remanente en las cámaras del gasómetro (véase procedimiento técnico: Liberación flash).
- x. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de entrada y ajustar la presión interna a la presión atmosférica manipulando la perilla del gasómetro.
- xi. Definir el número de etapas o intervalos de presión a los que se va a realizar la liberación diferencial.  
**Nota:** se requieren aproximadamente de ocho a diez etapas por debajo del punto de burbuja, siendo la última a condiciones atmosféricas.
- xii. Fijar el sistema a una presión constante igual a la presión de burbuja. Para ello, en el panel de control del modo presión constante (véase paso iii) ingresar un *set point* de presión adecuado (Pb) y presionar el botón *Start*.
- xiii. Esperar hasta que la muestra se estabilice, es decir, que la presión y el volumen que se muestran en pantalla no varíen. Registrar la presión y el volumen en el cuaderno de laboratorio.
- xiv. Fijar una nueva presión menor a la presión de burbuja (véase paso xiii). Mantener la agitación de la muestra por un periodo de dos horas.
- xv. Detener la agitación y esperar por un periodo de una hora hasta que la muestra en reposo se estabilice. Observar por el visor la fase del fluido, debe estar bifásica (gas y líquido).
- xvi. Anotar en el cuaderno de laboratorio la presión, y el volumen en la celda (volumen de gas + volumen de líquido).
- xvii. Desplazar todo el volumen de gas al vial a presión constante. Para ello, verificar que el modo de control de la celda bomba corresponda al modo *Constant Pressure*. Seguidamente, abrir lenta y cuidadosamente las válvulas MV18 y MV17, en ese orden. Observar la salida de crudo en el vial.
- xviii. Cerrar las válvulas MV17 y MV18 en ese orden, inmediatamente después de haber retirado todo el gas de esa etapa (cuando por el visor se observe la

interfase gas-líquido), esto para garantizar que sólo se retira gas y no hay extracción de líquido.

- xix. Esperar hasta que se estabilice el sistema y anotar el volumen de líquido remanente en la celda. Luego, activar el agitador magnético de la celda.
- xx. Medir y anotar el volumen acumulado de gas. Es de hacer notar que para obtener una lectura correcta del volumen de gas, se debe verificar que la presión en el manómetro sea igual a cero, de lo contrario ajustarla manipulando la perilla del gasómetro.
- xxi. Abrir la válvula del cilindro recolector de gas (MVc), sumergido en nitrógeno líquido para bajar la temperatura del mismo y provocar el paso del gas, del gasómetro al cilindro por diferencia de presiones. Este proceso se realiza hasta que se agote el volumen de gas en el gasómetro; esto se puede observar por medio de la lectura del manómetro, el cual tenderá a una lectura negativa.  
**Nota:** las salpicaduras de nitrógeno líquido producen quemaduras profundas y graves, por lo cual manipular con precaución y emplear guantes aislantes para bajas temperaturas, careta facial y bata.
- xxii. Cerrar rápidamente la válvula de tres vías (MVa) para evitar daños en el manómetro.
- xxiii. Cerrar la válvula del cilindro recolector de gas (MVc).
- xxiv. Abrir la válvula de tres vías (MVa) hacia el puerto de venteo para que no quede tanto tiempo el manómetro en negativo y evitar daños.
- xxv. Retirar el cilindro y colocar una etiqueta de identificación indicando: (a) nombre del pozo, (b) profundidad, (c) presión, (d) temperatura, y (e) fecha.
- xxvi. Colocar otro cilindro y practicarle vacío al sistema (vial, conexión tipo cruz, cilindro recolector de gas, y línea), (véase procedimiento técnico: Liberación flash).
- xxvii. Ir al paso siguiente si se desea efectuar una nueva etapa, si esta etapa corresponde a la presión de abandono, ir al último paso.
- xxviii. Iniciar una nueva etapa de agotamiento. Disminuir la presión de acuerdo a la nueva etapa y repetir desde el paso xiv.

xxix. Realizar un flash en una sola etapa (véase procedimiento técnico: Liberación flash).

## **B.5 PRUEBA DE SEPARADORES**

Los equipos utilizados para realizar este experimento son los siguientes:

- Sistema Chandler PVT libre de mercurio modelo 3000.
- Separador Flash de dos etapas
- Gasómetro de doble celda. Modelo 2331d.
- Cilindro recolector de gas para análisis.
- Líneas y conexiones.
- Vial.
- Balanza electrónica.
- Bomba de vacío.
- Helio.
- Nitrógeno líquido.

La figura B.6 que se muestra a continuación presenta el diagrama de los equipos usados en este procedimiento.

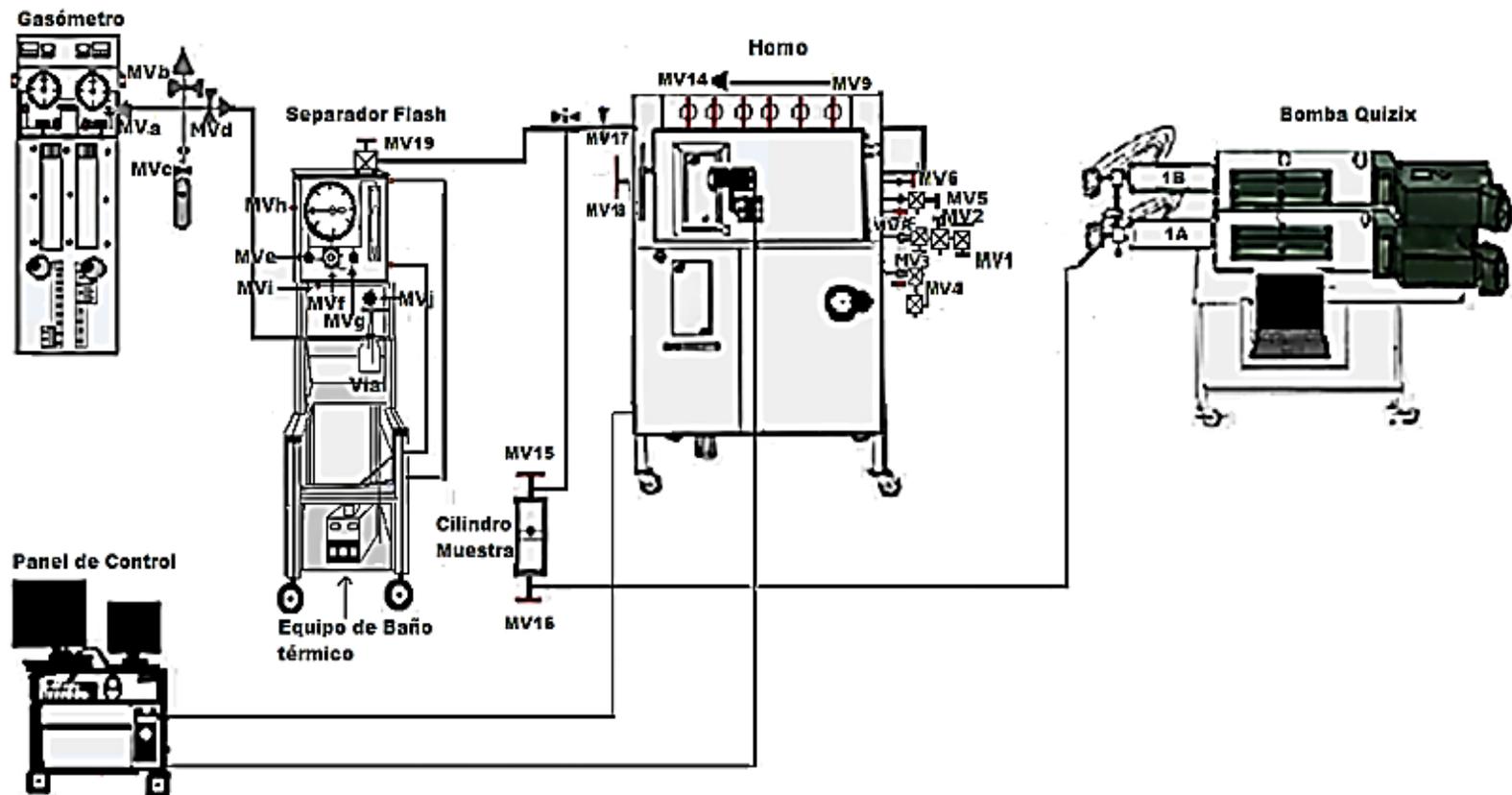


Figura B.6: Esquema de los equipos de laboratorio para la prueba de separadores.

El procedimiento experimental es el siguiente:

- i. Cerrar la válvula de entrada *FLASH VALVE* (MV14) y la válvula de drenaje *DRAIN VALVE* (MVj), abrir la válvula reguladora *REGULATOR OFF* (MVe), y cerrar la válvula de paso *BYPASS OFF* (Mvg).
- ii. Conectar el gasómetro al puerto *GAS TEST* (MVi), el cual es la salida para el gas separado en la primera etapa (desde la cámara -1<sup>era</sup> etapa- del separador).
- iii. Conectar otro gasómetro (o la segunda cámara del mismo gasómetro) a la conexión de salida de gas de la segunda etapa (el conector en la parte derecha de la cruz entre la válvula de drenaje *DRAIN VALVE* (MVj) de la primera etapa y el tubo receptor de la segunda etapa). Colocar el matraz para pesaje de gas en la línea aguas arriba del gasómetro (entre el separador flash y el gasómetro) de tal manera que la gravedad del gas pueda ser determinada. Si se requiere medir la gravedad del gas de ambas etapas, conectar un matraz para pesaje de gas en ambas líneas de salida de gas.
- iv. Conectar un tubo receptor de la segunda etapa al fondo del instrumento.
- v. Conectar una tubería desde el puerto de venteo *RELIEF VALVE VENT* (MVh) a una campana de extracción, o hasta algún área segura afuera del laboratorio. Similarmente, conectar una tubería desde las salidas del gasómetro a un área segura.
- vi. Ajustar la perilla del regulador de contrapresión a aproximadamente la presión de prueba deseada para la primera etapa del separador (o ajustarla a un valor cercano a su máxima presión {completamente en sentido horario}, y luego ajustar la presión a un valor más bajo {sentido anti-horario} durante la carga/inyección de la muestra).
- vii. Conectar la muestra presurizada a la válvula de entrada *FLASH VALVE* (MV14) del separador, y usar una bomba externa para presurizar la muestra a la presión de entrada deseada.
- viii. Si la prueba está prevista ser realizada a otra temperatura diferente a la temperatura del laboratorio (calentada o enfriada), conectar tuberías hasta y

desde un calentamiento re circulante y/o baño de enfriamiento hasta las conexiones de entrada/salida de líquido para calentamiento/enfriamiento ubicadas en el costado, y circular el fluido calentado o enfriado alrededor de la cámara hasta que el equilibrio sea alcanzado a la temperatura deseada para la prueba de separador. Un termómetro es provisto para monitorear la temperatura.

- ix. Expandir la muestra de fluido dentro del separador manteniendo constante la presión de entrada de la muestra con la bomba externa, y cuidadosamente abrir la válvula de entrada *FLASH VALVE* (MV14) para cargar (inyectar) de 10 a 20 cc para purgar el sistema, mientras se mantiene constante la presión de entrada de la muestra con la bomba externa.
- x. Simultáneamente, ajustar la presión de separación de la primera etapa mediante el ajuste de la perilla en el regulador de contrapresión, a una presión apenas ligeramente por encima de la presión deseada para la prueba.
- xi. Cerrar la válvula de entrada *FLASH VALVE* (MV14) y lenta y cuidadosamente, abrir la válvula de drenaje *DRAIN VALVE* (MVj) para drenar justo el líquido suficiente desde la cámara de la primera etapa del separador para ajustar el nivel de líquido a la marca de referencia (0 cc) ubicada cerca del fondo de la cámara. El líquido drenado hacia el tubo receptor de la segunda etapa se convierte en el “petróleo del tanque de almacenamiento” a presión y temperatura atmosférica.
- xii. También, cuidadosamente ajustar la perilla del regulador de contrapresión para obtener la presión de la prueba deseada para la primera etapa.
- xiii. Registrar la lectura de volumen inicial de la bomba externa, y la lectura de volumen inicial del gasómetro para el gas de la primera etapa desde la conexión *GAS TEST* (MVi) (gas separado durante esta primera etapa de separación desde la muestra en la cámara de primera etapa del separador).
- xiv. Desconectar el tubo receptor de la segunda etapa, desechar el líquido (petróleo del tanque de almacenamiento) del tubo, y limpiarlo.

- xv. Pesar el tubo receptor de la segunda etapa y cualquier pequeña cantidad de petróleo del tanque de almacenamiento remanente en él.
- xvi. Re-conectar el tubo receptor de la segunda etapa al separador.
- xvii. Registrar o llevar a cero la lectura inicial de volumen del gasómetro para el gas de la segunda etapa (gas separado durante esta segunda etapa de separación a presión atmosférica, del líquido en el tubo receptor de la segunda etapa). También registrar el volumen inicial (si existe) de líquido remanente en el tubo receptor de la segunda etapa.
- xviii. Similar al paso ix previo, excepto con la válvula de drenaje *DRAIN VALVE (MVj)* cerrada, cargar (inyectar) más líquido a alta presión, expandirlo en la cámara de la primera etapa del separador, mientras se mantiene constante la presión de entrada de la muestra (con la bomba externa) y la presión de la primera etapa (con el regulador de contrapresión).
- xix. Continuar inyectando hacia el separador hasta que la cámara de la primera etapa o el tubo receptor de la segunda etapa esté cercano a llenarse (aproximadamente 20-30 cc), y cerrar la válvula *FLASH VALVE (MV14)*.
- xx. Registrar la nueva lectura (final) de volumen de la bomba externa, y la lectura final de volumen del gasómetro para el gas de la primera etapa desde la conexión *GAS TEST (MVi)* (gas separado durante esta primera etapa de separación desde la muestra en la cámara de primera etapa del separador).
- xxi. Registrar el volumen de líquido en la cámara de primera etapa del separador.
- xxii. Calcular como sigue:
  - a. Volumen de fluido de yacimiento inyectado a alta presión = lectura final de la bomba – lectura inicial de la bomba. Multiplicar por cualquier Factor de Expansión Térmico (o Contracción), si es necesario, si la bomba y la muestra de fluido están a diferentes temperaturas.
  - b. Volumen de líquido separado de la 1<sup>era</sup> etapa del separador = lectura final de volumen del separador – lectura inicial de volumen del separador.

- c. Volumen de gas separado de la 1era etapa del separador = lectura final de volumen del gasómetro – lectura inicial de volumen del separador – volumen de líquido separado de la 1<sup>era</sup> etapa del separador.
- xxiii. Cuidadosamente abrir la válvula *DRAIN VALVE (MVj)* para drenar el líquido de la primera etapa del separador hacia el tubo receptor de la segunda etapa (donde se convierte en “petróleo del tanque de almacenamiento” a presión atmosférica), y cerrar la válvula *DRAIN VALVE (MVj)* para ajustar el nivel de líquido a la marca de referencia ubicada en el fondo de la cámara de la primera etapa.
- xxiv. Registrar el volumen de líquido en el tubo receptor de la segunda etapa, y la nueva lectura de volumen del gasómetro para el gas de la segunda etapa (gas separado durante esta segunda etapa de separación a presión atmosférica, del líquido en el tubo receptor de la segunda etapa).
- xxv. Desconectar el tubo receptor de la segunda etapa y de nuevo pesarlo y pesar el petróleo del tanque de almacenamiento que contiene.
- xxvi. Calcular como sigue:
- a. Volumen de petróleo del tanque de almacenamiento = lectura final de volumen del tubo receptor – lectura inicial de volumen del tubo receptor.
  - b. Volumen de gas separado en la segunda etapa del separador (también llamado “vapores del tanque de almacenamiento”) = Lectura final de volumen del gasómetro – lectura inicial de volumen del gasómetro – volumen de petróleo del tanque de almacenamiento.
  - c. Densidad del petróleo del tanque de almacenamiento = (peso final del tubo y el petróleo – peso inicial del tubo y el petróleo) / volumen de petróleo del tanque de almacenamiento.
- xxvii. Corregir los volúmenes de líquido y gas calculados a las condiciones estándar deseadas, para propósitos de reportar.

- xxviii. Repetir la prueba a varias presiones diferentes para la primera etapa del separador para encontrar la presión óptima del separador, y hacer una tabla de los resultados para propósitos de reportar.