



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“ESTABILIZACION DE PETROLEO CRUDO
CON ULTRASONIDO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

GUILLERMO HERNANDEZ SILVERIO

ASESOR: DRA. JETZABETH RAMIREZ SABAG



MEXICO, D.F.

2005

m. 345204



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Hernández
Silverio Guillermo
FECHA: 2 de junio - 2005
FIRMA: [Firma]

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-519

SR. GUILLERMO HERNÁNDEZ SILVERIO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Jetzabeth Ramírez Sabag y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO CON ULTRASONIDO

- INTRODUCCIÓN
- I CONCEPTOS BÁSICOS
- II PROCESOS CONVENCIONALES DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO
- III TEORÍA DEL ULTRASONIDO EN EL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO
- IV DISEÑO DE PRUEBAS DE LABORATORIO DEL SISTEMA ULTRASÓNICO
- V DISEÑO DE PRUEBAS EN UNA BATERÍA DE SEPARACIÓN PARA EL SISTEMA ULTRASÓNICO
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D. F., a 12 de mayo de 2005
EL DIRECTOR

[Firma]
M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB*JAGC*gtg

**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS:

“ESTABILIZACIÓN DE PETROLEO CRUDO CON ULTRASONIDO”

PRESENTADA POR:

GUILLERMO HERNÁNDEZ SILVERIO

DIRIGIDA POR:

DRA. JETZABETH RAMÍREZ SABAG

JURADO PARA EL EXAMEN PROFESIONAL

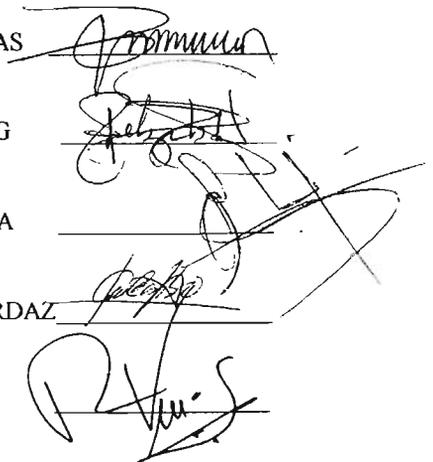
PRESIDENTE : ING MANUEL VILLAMAR VIGUERAS

VOCAL : DRA. JETZABETH RAMÍREZ SABAG

SECRETARIO : M.I. JOSÉ ÁNGEL GÓMEZ CABRERA

1er SUPLENTE : ING GUADALUPE CONTRERAS ORDAZ

2do SUPLENTE : ING RAFAEL VIÑAS RODRÍGUEZ



Handwritten signatures of the jury members, including Manuel Villamar Viguera, Jetzabeth Ramírez Sabag, José Ángel Gómez Cabrera, Guadalupe Contreras Ordez, and Rafael Viñas Rodríguez.

AGRADECIMIENTOS

A MI MADRE

Por su comprensión apoyo incondicional en los momentos más difíciles y porque supo guiar a nuestra familia.

A MI PADRE +

Por su ejemplo que me brindo por la vida y por sus consejos para lograr esta meta.

A MIS HERMANOS

Por su tenacidad para continuar ante la adversidad y por brindarme su confianza.

A MI ESPOSA

Por ser la persona que llevo a mi vida a ser un motivo más para este logro y por el amor y apoyo incondicional que para mí representa.

A MIS HIJAS

Gabriela y Naomi porque representan el motivo más grande en mi vida

A MIS MAESTROS

*A la Dra. Jetzabeth Ramírez
Que bajo su dirección fue
posible la realización de este
trabajo.*

*A la Ing. Guadalupe Contreras
por la confianza, tiempo y
apoyo que me brindó.*

*Y a todos los que
contribuyeron a mi formación
como profesionista.*

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

*Porque es el máximo sueño al que puede
aspirar un estudiante.*

A DIOS

*Por la fe que representa y
por él que todo es posible.*

CONTENIDO

RESUMEN

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

- I.- CONCEPTOS BÁSICOS

- II.- PROCESOS CONVENCIONALES DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO

- III.- TEORÍA DEL ULTRASÓNIDO EN EL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO

- IV.- DISEÑO DE PRUEBAS DE LABORATORIO DEL SISTEMA ULTRASÓNICO

- V.- DISEÑO DE PRUEBAS EN UNA BATERÍA DE SEPARACIÓN PARA EL SISTEMA ULTRASÓNICO

- VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

**ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO CON ULTRASONIDO
CONTENIDO**

CONTENIDO	Página
RESUMEN	i
CONTENIDO	ii
INTRODUCCIÓN	v
CAPITULO I CONCEPTOS BÁSICOS	1
1.1 DEFINICIONES	1
1.2 INSTALACIONES SUPERFICIALES PARA POZOS PRODUCTORES DE CRUDO Y GAS	13
1.3 ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO	16
CAPITULO II PROCESOS CONVENCIONALES DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO	17
2.1 SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN CON TORRE DE DESTILACIÓN	17
2.2 ESTABILIZACIÓN POR PROCESO MULTITAPA	23
2.3 ESTABILIZACIÓN POR TRANSFERENCIA DE CALOR	33
2.4 ESTABILIZACIÓN CON ENERGÍA ULTRASÓNICA	36
CAPITULO III TEORÍA DEL ULTRASONIDO EN EL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO	39
3.1 TEORÍA DEL ULTRASONIDO	39
3.2 ONDAS SONORAS	41
3.3 INTENSIDAD DEL SONIDO	43
3.4 POTENCIA	45
3.5 ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA OBTENER UNA EXPRESIÓN (ECUACIÓN) EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA REQUERIDA POR EL TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO PARA LA LIBERACIÓN DE GAS DE UNA MEZCLA DE CRUDO.	47
CAPITULO IV DISEÑO DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO DEL SISTEMA ULTRASÓNICO	53

**ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO CON ULTRASONIDO
CONTENIDO**

4.1 TRASPASO DE LA MUESTRA	53
4.2 DESARROLLO Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	56
4.3 ANÁLISIS QUÍMICO DE COMPUESTO	65
4.4 POTENCIA REQUERIDA PARA GENERAR CAVITACIÓN	70
CAPITULO V	
DISEÑO DE PRUEBAS EN UNA BATERÍA DE SEPARACIÓN PARA EL SISTEMA ULTRASÓNICO	77
5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ULTRASÓNICO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE CRUDO	77
5.2 CARACTERÍSTICAS Y REQUERIMIENTOS DE UNA BATERÍA DE SEPARACIÓN PARA LA PRUEBA	80
5.3 PROGRAMA PARA LA PRUEBA TECNOLÓGICA EN CAMPO	82
5.4 CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA BELLOTA	83
5.5 MODIFICACIONES EN LA BATERÍA BELLOTA PARA LA PRUEBA	85
5.6 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA TECNOLÓGICA DE CAMPO	86
5.7 PROBLEMÁTICA DE CAMPO EN LA OPERACIÓN DE LA PRUEBA	87
5.8 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN CAMPO CON EL SISTEMA ULTRASÓNICO	89
CAPITULO VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
6.1 CONCLUSIONES	94
6.2 RECOMENDACIONES	95
LISTA DE FIGURAS	96
LISTA DE TABLAS	98
BIBLIOGRAFÍA	100

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo presentar una alternativa para la estabilización de petróleo crudo con energía ultrasónica, así como la metodología de las pruebas realizadas en laboratorio y en el campo.

En el Capítulo I se presentan brevemente los conceptos y definiciones empleados en el proceso de estabilización.

Dada la importancia de describir los procesos convencionales más representativos para la estabilización de petróleo crudo en la industria petrolera, en el Capítulo II se presentan los métodos de estabilización, con torre de destilación, por proceso multietapa, por transferencia de calor y estabilización de petróleo crudo con energía ultrasónica.

La teoría del ultrasonido, se presenta en el Capítulo III, como antecedente y se presenta el análisis adimensional para obtener la ecuación que representa la absorción de la energía ultrasónica en el petróleo crudo, así mismo se generaron las curvas características del comportamiento del fenómeno en estudio.

En el Capítulo IV se presenta el diseño de las pruebas de laboratorio para evaluar la liberación de gas cuando se le aplica energía ultrasónica a un hidrocarburo, así como los resultados de estas pruebas con la variación de los parámetros como son: incremento de temperatura, decremento de presión y la potencia requerida por el transductor para generar cavitación.

Es importante hacer la descripción de cada uno de los componentes del equipo ultrasónico, por lo que en el Capítulo V se presentan, incluso las características y requerimientos de una batería de separación, para la instalación del equipo y realización de la prueba. Una vez seleccionada la batería de separación se presentan las modificaciones realizadas en la batería para la prueba con la herramienta ultrasónica.

El análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de campo, empleando el método de estabilización de petróleo crudo con ultrasonido y el convencional (multietapa); se presentan en el Capítulo VI, correspondiente a las conclusiones y recomendaciones del trabajo de tesis.

INTRODUCCION

PEMEX es la empresa más grande de México y una de las diez más grandes del mundo. Con base en el nivel de reservas y su capacidad de extracción y refinación, se encuentra entre las cinco compañías petroleras más importantes a nivel mundial. La Región Sur acumula 25 % de las reservas de gas del país y 18 % de las reservas de petróleo crudo. En la región norte se ubica 35 % de las reservas de petróleo crudo y el 57 % de las reservas totales de gas.

Este extraordinario potencial de las diferentes regiones productoras, obliga a PEMEX Exploración y Producción, establecer, como su visión a largo plazo, el ser reconocida como una empresa de alta productividad en el manejo de hidrocarburos, comprometida con el desarrollo y bienestar de su personal y siempre respetuosa de las comunidades y el entorno ecológico en el que opera, por lo que la protección al medio ambiente es de mayor relevancia en las operaciones de exploración y producción que se realizan en la sonda de Campeche, de la que se obtiene gran parte de la producción nacional de petróleo crudo.

Para cubrir las necesidades que tiene la industria petrolera, se requiere lograr la optimización de las instalaciones con las que actualmente se cuentan; un ejemplo, son las instalaciones utilizadas para la estabilización del crudo, necesarias para separarlo en crudo, gas y condensado, que cumplan con los parámetros y especificaciones de venta, tanto nacionales como internacionales.

En este trabajo de tesis se resumen algunos de los estudios que han realizado diversos investigadores, de los procesos para la correcta estabilización del petróleo crudo, enfocados al tipo ligero de México, problema que de ser solucionado, podría incrementar su calidad, valor comercial, eliminar problemas de penalizaciones por parte del cliente y de seguridad, además de los referentes al entorno ecológico.

Los procesos convencionales, en algunos casos, no logran estabilizar el petróleo crudo en forma óptima y en consecuencia, se presentan problemas en los tanques de almacenamiento (dispositivos para almacenar el petróleo crudo obtenido de la producción, hasta que exista un mercado para su venta o bien hasta que tenga sitio para su refinamiento). En los tanques se generan las

mayores pérdidas por evaporación, siendo los gases generados venteados a la atmósfera o alineados al quemador.

Las pérdidas por evaporación durante el almacenado de petróleo crudo, no solo traen consigo la reducción de volumen, sino además, reduce su valor comercial ya que son las fracciones ligeras, de mayor costo las que se evaporan, aumenta la corrosión en el tanque de almacenado y se tiene un mayor riesgo de explosión.

Debido a que el petróleo crudo debe ser estabilizado en superficie, y en esta etapa es donde se presentan los diferentes fluidos que lo conforman (crudo, gas y condensado), es importante estudiar los diferentes procesos de estabilización con los que se cuentan para optimizar el proceso, analizando a detalle su equipo y funcionamiento revisando las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de estabilización.

En la actualidad, mediante procesos normales de estabilización se logra un equilibrio parcial de las fases del petróleo crudo (gas-aceite), sin embargo es necesario proporcionarle un tratamiento adicional para lograr la estabilización óptima. Dado el requerimiento anterior el Instituto Mexicano del Petróleo desarrollo, el proyecto “Sistema Ultrasónico para la Estabilización de Crudo” con el fin de proponer una nueva alternativa de estabilización del petróleo crudo, en el cual se basa este trabajo de tesis, y con ello lograr satisfacer las más altas exigencias de calidad en las transacciones comerciales de México.

CAPITULO I

CONCEPTOS BÁSICOS

CAPITULO I

En este capítulo se describen una serie de conceptos básicos y definiciones empleados comúnmente en la ingeniería petrolera y que tienen como finalidad entender con claridad los capítulos posteriores. Los conceptos son descritos de manera breve y clara, sin salir del objetivo para el cual fue creado este capítulo. Si el lector desea profundizar sobre los conceptos que se mencionan, se recomienda consultar las referencias bibliográficas.

1.1 DEFINICIONES.

1.1.1 PRESIÓN

La presión (Rodríguez Nieto R. 1990: "APUNTES DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Facultad de Ingeniería, UNAM.) se define como la fuerza normal que actúa sobre una superficie, en otras palabras es la fuerza ejercida por unidad de área. La presión tiene unidades de fuerza por unidad de área, y generalmente se mide en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) o bien, en libra por pulgada cuadrada (lb/in^2). A la medición de presión que se realiza con manómetro y manógrafo se le conoce como presión relativa o manométrica.

La presión absoluta (Streeter, V. L. y E. B. Wylie, 1997: "MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Mc Graw Hill, México.) es igual a la suma de la presión manométrica más la presión atmosférica del lugar donde se efectúe la medición. La presión o peso de la atmósfera al nivel del mar es de $1.033 \text{ (kg}/\text{cm}^2)$, 101.3027 (Kpa) , a cierta latitud.

1.1.2 PESO ESPECÍFICO.

El peso específico (Rodríguez Nieto R. 1990: "APUNTES DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Facultad de Ingeniería, UNAM.) de una sustancia se define como el peso de una unidad de volumen y representa la fuerza que ejerce la aceleración de la gravedad por unidad de volumen de la sustancia.

La densidad (Rodríguez Nieto R. 1990: "APUNTES DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Facultad de Ingeniería, UNAM.) y se define como su masa por unidad de volumen, se expresa en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3), libras por galón (lb/gal).

La densidad relativa (Rodríguez Nieto R. 1990: "APUNTES DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Facultad de Ingeniería, UNAM.) de un cuerpo es un número adimensional que está dado por la relación del peso del cuerpo al peso de un volumen igual de una sustancia que se toma como referencia; en este caso se hace con el agua.

La densidad API (Rodríguez Nieto R. 1990: "APUNTES DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Facultad de Ingeniería, UNAM.) se aplica a hidrocarburos líquidos y es una escala arbitraria en la cual 10 grados API, es igual a la densidad del agua (1 litro de agua pura, exenta de sólidos a una temperatura de 4 °C, pesa 1 kg). La densidad API varía en sentido opuesto a la densidad relativa. Cuanto más ligero es el aceite o una fracción del petróleo, la densidad API será mayor. Por ejemplo la kerosina tiene aproximadamente 42 grados API, la gasolina es más ligera que la kerosina con 60 grados API.

$$^{\circ}\text{API} = (141.5/\gamma^{\circ}) - 131.5$$

donde:

$$\gamma^{\circ} = \text{densidad relativa del líquido.}$$

1.1.3 MISCIBILIDAD.

Término que se emplea para indicar que dos fluidos se mezclan o disuelven homogéneamente, en el caso en el que los fluidos no se mezclan, (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) el fluido más ligero flota sobre el más pesado, se dice que son inmiscibles.

Todos sabemos que el agua y el aceite no se mezclan y se advierte una superficie de separación entre ambos líquidos. En cambio la gasolina y el gasóleo ligero son miscibles en todas proporciones.

1.1.4 CALOR LATENTE Y CALOR SENSIBLE.

El calor (James E. Brady, 1980: "QUÍMICA BÁSICA PRINCIPIOS Y ESTRUCTURA", Limusa, México.) es una forma de energía. Específicamente el calor es energía térmica en

tránsito. Agregar calor a una sustancia, significa que se está agregando energía térmica. La cantidad de energía térmica de un material cualquiera, depende de su temperatura. A altas temperaturas, las sustancias tienen una gran cantidad de calor o energía térmica. A bajas temperaturas las sustancias tienen una cantidad de energía térmica pequeña. La temperatura es una medida de la intensidad de calor.

CALOR SENSIBLE (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) es el calor agregado a un cuerpo o sustancia para aumentar su temperatura. Como unidad tiene la caloría (cantidad de calor capaz de elevar de 14.5 °C a 15.5 °C la temperatura de un gramo de agua destilada).

Cuando se calienta el hielo, una vez que la temperatura llega a 0°C, su temperatura no se incrementa hasta que todo el hielo se ha fundido. El hielo tiene que absorber calor para fundirse, pero aunque esté absorbiendo calor su temperatura permanece constante, de la misma forma cuando el agua hierve y se transforma en vapor la temperatura no aumenta arriba de 100°C. Este calor se denomina calor latente.

CALOR LATENTE (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) es la cantidad de calor necesaria para hacer pasar la unidad de masa de una sustancia de un estado a otro, la temperatura de cambio de estado es específica de dicha sustancia y se expresa en (cal·mol⁻¹) o en (cal·g⁻¹).

ENTALPÍA (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) es la capacidad de transferencia de calor que tiene un cuerpo, o bien es la capacidad de un cuerpo para ceder o recibir calor.

Para calentar agua se debe aplicar calor sensible. Cuando el agua alcanza su temperatura de ebullición, para transformarla en vapor, habrá que agregar calor latente. A fin de condensar un vapor se deberá quitar o remover calor latente, quedando el condensado a la misma temperatura que el vapor. Para enfriar el condensado habrá que quitar calor sensible. En consecuencia: si el calor sensible de una sustancia es removido, la temperatura desciende, esto es, la sustancia se enfría. Si el calor latente de una sustancia es removido, la temperatura permanece constante, pero, la sustancia cambiara de estado físico, es decir, pasará de vapor a líquido o de líquido a sólido.

1.1.5 PRESIÓN DE VAPOR.

La presión de vapor (Streeter, V. L. y E. B. Wylie, 1997: "MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Mc Graw Hill, México.) se define como la presión que ejerce el vapor de una sustancia cuando ésta y el vapor están en equilibrio. El equilibrio se establece cuando el ritmo de evaporación de una sustancia es igual al ritmo de condensación de su vapor. Los líquidos se evaporan porque las moléculas escapan de su superficie. Cuando el espacio por encima del líquido está limitado, las moléculas de vapor ejercen una presión parcial en dicho espacio llamada presión de vapor.

Después de un tiempo suficiente, el número de moléculas de vapor que chocan contra la superficie del líquido y de nuevo se condensan es justamente igual al número de las que escapan en un intervalo de tiempo y existe un equilibrio. Como este fenómeno depende únicamente de la actividad molecular, la cual es función de la temperatura, la presión de vapor de un fluido dado depende de la temperatura y aumenta con ella.

En los líquidos las fuerzas de cohesión son moderadas. La "estructura" de un líquido hasta cierto punto es ordenada, y las moléculas pueden tener movimiento de traslación, pero no con tanta libertad como la de los gases. Los líquidos poseen un orden de corto alcance, o sea, que forman pequeños grupos ordenados de moléculas debido a las fuerzas de cohesión presentes. Algunas de las características relevantes de los líquidos son su presión de vapor, tensión superficial y la viscosidad.

1.1.6 PUNTO DE EBULLICIÓN.

La temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido es igual a la presión atmosférica, se conoce como punto de ebullición (James E. Brady, 1980: "QUÍMICA BÁSICA PRINCIPIOS Y ESTRUCTURA", Limusa, México.) del líquido. Si se agrega calor a un líquido, la temperatura del mismo no se eleva indefinidamente sino que llega un momento en que por intenso que sea el calor agregado, la temperatura permanece constante, y toda la energía térmica adicionada se invierte en transformar el líquido en vapor. A esta temperatura se le llama punto de ebullición del líquido.

1.1.7 ENRIQUECIMIENTO Y AGOTAMIENTO.

Se llama **ENRIQUECIMIENTO** (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) al proceso por el cual una mezcla se hace más concentrada o más rica en uno de sus componentes. Si un recipiente cerrado está parcialmente lleno de una mezcla de dos líquidos, parte de las moléculas de ambos líquidos escaparán formando el espacio de vapor, al mismo tiempo, algunas moléculas de vapor regresarán al seno del líquido. Si uno de los dos líquidos es más ligero que el otro, las moléculas del líquido ligero escaparán más rápidamente de la mezcla, quedando mayor cantidad de moléculas pesadas en la mezcla. Así pues, cuando hay equilibrio habrá mayor número de moléculas ligeras escapando y regresando al líquido.

Puesto que las moléculas ligeras escapan más rápidamente del líquido que las moléculas pesadas, las ligeras tendrán a concentrarse en el vapor. Esto es, cuando una mezcla de líquido esta en equilibrio con su vapor, el vapor es más rico en componentes ligeros, al mismo tiempo que el líquido se enriquece en componentes pesados.

Si una parte del vapor contenido en el recipiente mencionado, es removido y condensado en otro recipiente diferente, el líquido condensado en éste segundo recipiente es más rico en componentes ligeros, en tanto que el líquido residual en el primer recipiente, se habrá enriquecido en componentes pesados. También se dice que la mezcla se ha agotado.

El término **AGOTAMIENTO** (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) se refiere al proceso de separación de componentes ligeros de una mezcla, dejando un producto líquido relativamente puro en componentes pesados.

Cuando dos o más líquidos puros se mezclan, a los líquidos originales puros se les llama **COMPONENTES** de la mezcla. (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México)

Cuando el número de moléculas que salen del líquido es igual al número de moléculas que entran al líquido se dice que el líquido y el vapor están en equilibrio, y cuando la cantidad de moléculas que escapan del líquido es mayor que la que regresa, se dice que el líquido se está evaporando.

Se llama **EVAPORACIÓN** (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) al proceso en el cual el número de moléculas que escapan de un líquido es mayor que el que entra.

Se llama **CONDENSACIÓN** (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) al proceso por el cual entran al líquido un número de moléculas superior al que salen de él.

1.1.8 VOLATILIDAD, LÍQUIDOS LIGEROS Y LÍQUIDOS PESADOS.

El término volatilidad (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) se utiliza para referirse a la facilidad de vaporización, cuando un líquido tiende a vaporizarse con facilidad, se dice que tiene alta volatilidad. Cuando no se presenta esta facilidad, se dice entonces que tiene baja volatilidad. Un líquido con baja presión de vapor tiene baja volatilidad y un líquido con alta presión de vapor tiene alta volatilidad.

La gasolina, el alcohol y el éter, son líquidos que tienen alta volatilidad; el mercurio, es un líquido que tiene baja volatilidad, se dice que es poco volátil.

LÍQUIDO LIGERO. (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) Término que se emplea cuando el líquido tiende a vaporizar fácilmente, es decir, tiene alta volatilidad, tiene alta presión de vapor y baja temperatura de ebullición.

LÍQUIDO PESADO. (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.) Un líquido pesado está compuesto de moléculas grandes, no se vaporiza con facilidad, es decir tiene baja volatilidad, tiene baja presión de vapor y alta temperatura de ebullición.

En la práctica de la ingeniería petrolera, cuando se habla de líquidos ligeros o pesados, no se está haciendo referencia al peso específico o densidad del líquido, sino a la volatilidad o facilidad de vaporización. Por ejemplo, el agua tiene un peso específico mayor que el aceite crudo, por lo cual, el aceite es más volátil y menos pesado que el agua.

1.1.9 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.

ACEITE RESIDUAL. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es el líquido que permanece en la celda de Presión Volumen Temperatura (PVT) al terminar un proceso de

separación en el laboratorio. Generalmente, el aceite residual se determina a condiciones estándar (60 °F y 14.7 lb/in² abs.)

ACEITE EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO. (Garaicochea Petrirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es el líquido que resulta de la extracción del petróleo de un yacimiento por medio del equipo superficial empleado para separar los componentes gaseosos. Las propiedades y la composición del petróleo dependen de las condiciones de separación empleadas, como son, número de etapas de separación, presión y temperatura. El petróleo en el tanque se acostumbra reportarlo a condiciones estándar.

CONDICIONES ESTÁNDAR. (Garaicochea Petrirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Las condiciones estándar son definidas por los reglamentos de los estados o países. Por ejemplo en el estado de Texas las condiciones base son: $P= 14.65$ (lb/in²) abs y $T= 60$ °F mientras que en colorado son $P= 15.025$ (lb/in²) abs. y $T= 60$ °F. Aquí en México se consideran de $P= 14.69$ (lb/in²) abs y $T= 60$ °F.

FACTOR DE VOLUMEN DEL GAS. (Garaicochea Petrirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Se define como el volumen de una masa de gas medido a presión y temperatura del yacimiento, dividido por el volumen de la misma masa de gas medido a condiciones estándar.

FACTOR DE VOLUMEN DEL ACEITE. (Garaicochea Petrirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es la relación del volumen del aceite, medido a presión y temperatura del yacimiento, con el volumen de dicho aceite medido en el tanque de almacenamiento, a condiciones estándar, después de pasar por los separadores.

ENCOGIMIENTO. (Garaicochea Petrirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es la disminución de volumen que experimenta una fase líquida por efecto de la liberación de gas disuelto y por su contracción térmica. El factor de encogimiento es el recíproco del factor de volumen o deformación.

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD. (Garaicochea Petrirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Se denomina factor de desviación o factor de supercompresibilidad. Es un factor que se introduce a la

ley de los gases ideales para tomar en cuenta la desviación que experimenta un gas real con respecto a un gas ideal, es decir $PV=ZnRT(^{\circ}R)$, donde Z es el factor de compresibilidad.

FASE. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es la parte de un sistema que difiere, en sus propiedades intensivas, de la otra parte del sistema. Los sistemas de hidrocarburos generalmente se presentan en dos fases: gaseosa y líquida.

GAS DISUELTO. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es el conjunto de hidrocarburos que a condiciones atmosféricas constituye un gas, pero que forman parte de la fase líquida a condiciones de yacimiento.

LIBERACIÓN DE GAS DIFERENCIAL. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es el proceso de remoción de la fase gaseosa, de un sistema de hidrocarburos, a medida que se forma a condiciones de burbujeo. Por lo tanto, durante un proceso diferencial la composición del sistema varía continuamente.

LIBERACIÓN DE GAS INSTANTÁNEA. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es el proceso por el cual el gas se forma del líquido, al reducirse la presión, manteniéndose constante la composición total del sistema.

MOL. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Es la masa molecular de cualquier sustancia. Por ejemplo 16.04 (lb) de metano es una (mol-lb). En igual forma una (mole-g) de metano son 16.032 (g) del mismo gas. Una (mol-lb) de un gas ocupa 379 (ft³) a condiciones estándar.

RELACIÓN GAS ACEITE. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Son los pies cúbicos de gas obtenidos por cada barril de aceite producido, medidos ambos volúmenes a condiciones estándar.

Las condiciones de separación como presión, temperatura y etapas, afectan el valor de dicha relación.

RELACIÓN DE SOLUBILIDAD. (Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) Son los pies cúbicos de gas disuelto en el aceite a ciertas condiciones de presión y temperatura, por

cada barril de aceite en el tanque, medidos ambos volúmenes a condiciones estándar.

1.1.10 PRESIÓN DE VAPOR REID.

La presión de vapor Reid (PVR) (American Society for Testing and Materials, 1993: "ESTANDAR ASTM D-323", Pittsburgh, USA.) es un parámetro que permite conocer el grado de estabilización de hidrocarburos líquidos, indicando de una manera cualitativa la volatilidad de los mismos. Se le define como la presión que ejerce el vapor de una muestra en una celda especial, a 100 °F. Existen varias formas de evaluar la PVR en los crudos; pero la usada en México es la establecida estándar ASTM D-323 bajo el procedimiento A, la cual se describe a continuación.

1.- Descripción del equipo.

- Balas de acero con capacidad de 1 (lt).
- Conexiones para el muestreo (mangueras, manómetros de 0-100 psig, reducciones y herramientas).
- Baño de calentamiento vertical con termómetros.
- Cámara de refrigeración con termómetro.
- Cámara de líquidos para PVR.
- Cámara de vapor.
- Manómetros perfectamente calibrados.
- Cinta teflón.
- Acetona, turbosina o aromáticos para lavar y enjuagar el equipo.
- Aire comprimido para soplear las cámaras de líquidos y vapor.
- Estopa.

2.- Preparación de la prueba.

- a) Mantener el baño de calentamiento a una temperatura de 37.8°C (100°F).
- b) Mantener la cámara de refrigeración a 0°C (32°F) o menor.
- c) Introducir la cámara de vapor con el manómetro conectado al baño de calentamiento. Y sumergirla en el agua hasta 25.4(mm) = 1(in) arriba del tope superior de la cámara de vapor.

d) Mantener la cámara de vapor dentro del baño en un tiempo no menor de 10 minutos.

e) Introducir en la cámara de refrigeración la bala con la muestra y la cámara de líquido con agua para comprobar por medio de un termómetro de pluma que se ha alcanzado una temperatura de 0°C (32°F) en la muestra.

3.- Descripción del procedimiento.

a) Comprobar que se ha alcanzado la temperatura de enfriamiento deseada en la bala y la cámara de líquido, observando que el termómetro de pluma dentro de la cámara de líquido tenga una temperatura de 0°C (32°F). No desfogar gas durante el enfriamiento de la muestra.

b) Sacar la cámara de líquido y la bala simultáneamente de la cámara de refrigeración, vaciar el agua contenida en la cámara de líquido y drenar la muestra de la bala a la cámara, manteniendo en posición vertical la bala. Es necesario abrir la válvula superior ligeramente para permitir que la muestra se drene a la cámara de líquido. En los casos donde la muestra contenga agua se debe drenar la misma antes de transportar la porción de crudo a la cámara de líquido.

c) Llenar completamente la cámara de líquido, cerrar inmediatamente las válvulas de la bala y sacar la cámara de vapor del baño de calentamiento para conectar con la cámara de líquido en un tiempo no mayor de 10 segundos.

d) Apretar con fuerza la conexión de las cámaras, manteniendo la cámara de vapor arriba de la cámara de líquido.

e) Invertir la posición de las cámaras y drenar completamente la muestra de crudo a la cámara de vapor el tiempo suficiente para que se vacíe completamente la muestra.

f) Ya drenada la muestra agitar vigorosamente de arriba hacia abajo en un ángulo de 60° durante 8 veces manteniendo la cámara de líquido arriba de la cámara de vapor (posición invertida).

- g) Invertir la posición de las cámaras y meterlas al baño de calentamiento golpeando ligeramente el manómetro para sensibilizarlo antes de introducir los aparatos ensamblados.
- h) Esperar un tiempo de cinco minutos y registrar la presión indicada, volver a repetir el paso 5 y 6 nuevamente y registrar la presión, esta operación se debe hacer en intervalos de cinco minutos hasta que no se observe variación en las dos últimas lecturas observadas para registrar ésta como definitiva.

4.- Recomendaciones.

- a) Es importante contar con las conexiones y accesorios necesarios para la toma de muestras y usar estrictamente balas de acero con capacidad de 1 (lt).
- b) La toma de muestras debe hacerse de acuerdo al estándar ASTM D-4057 "Practice for manual sampling of petroleum products".
- c) Debido a que la comprobación del volumen contenido en la muestra, entre el 70 y 80%, es muy incierto, se recomienda llenar la bala lo máximo posible y para el caso de muestreo en líneas presionadas igual la presión en la línea y en la bala.
- d) Al tomar la muestra se debe de mantener la bala en posición vertical y conectar la toma de la muestra con la válvula inferior, manteniendo la válvula superior en la bala ligeramente abierta para comprobar que se llena por completo.
- e) Se recomienda evitar el desfogue de gas durante el enfriamiento de la bala para evitar la pérdida de gas que incrementa la PVR.
- f) Debido a que pruebas experimentales demuestran que no existe homogeneización de la muestra dentro de la bala, y que por gravedad se drenan los componentes más pesados hacia el fondo de la bala provocando que exista una ligera variación en la determinación de la PVR para diferentes porciones de la muestra, se recomienda efectuar dos o tres determinaciones en la misma muestra para ver el comportamiento de la PVR, sobre todo en crudos ligeros con algún contenido de agua.

g) Es importante lavar con acetona, turbosina u otro aromático las cámaras de líquido y vapor, desconectar el manómetro de la cámara de vapor y volverlo a conectar poniendo cinta teflón en las cuerdas, a las cámaras hay que secarlas sopleteándolas con aire comprimido después la lavarlas perfectamente, para evitar que se queden impregnados componentes volátiles en las paredes internas de estos aparatos.

h) Se debe contar con un equipo calibrador de manómetros para garantizar su precisión en las lecturas observadas. El equipo para generar vacío consta de una bomba, mangueras para conectar la bomba con la cámara, matraz receptor del líquido, conexiones para traspasar la muestra (reducciones, tubing de plástico de 1/8 de (in) ,válvula trifásica), cámara con válvulas superior de 1 (in) e inferior de 1/2 (in) y tapón de goma de 1 (in).

La determinación de la PVR óptima es de gran importancia, debido a que por regla general, se tiene que por cada (lb/in^2) abajo de este valor óptimo, se tendrá un 0.5 % de pérdidas en el volumen recuperado de aceite. Estos valores serán específicamente para el tipo de crudo que se está manejando y no podrán utilizarse para crudos que presenten diferentes propiedades. La obtención de los valores de PVR para un crudo específico, requiere de la elaboración de curvas de isoPVR para obtener el valor óptimo de PVR en las curvas mencionadas, para esto se utiliza la temperatura máxima presente durante el año en el interior del tanque de almacenamiento, y la presión atmosférica local mediante interpolaciones.

A continuación, se presenta la metodología para la determinación de la (PVR) óptima.

La determinación del valor óptimo de PVR es de gran importancia. En la definición de dicho valor de PVR, se requiere de la elaboración de las curvas de comportamiento que relacionen la temperatura con la PVR y la presión en la etapa de separación previa al tanque de almacenamiento; estas curvas serán específicamente para el tipo de crudo que se está manejando y no podrá utilizarse para crudos que presenten diferentes propiedades físicas.

Los valores de PVR deben de ser determinados gráficamente para un tipo de crudo específico, los cuales deben obtenerse mediante el

estándar ASTM D-323 para numerosas condiciones de presión y temperatura, para que final mente se pueda obtener las curvas de isoPVR.

El valor óptimo de PVR se obtiene con las curvas, a partir de la temperatura máxima que se presente durante el año en el interior del tanque de almacenamiento, subiendo hasta intersección la presión atmosférica local y posteriormente interpolando el valor de PVR correspondiente de las curvas más cercanas.

1.2 INSTALACIONES SUPERFICIALES PARA POZOS PRODUCTORES DE CRUDO Y GAS.

Los elementos para establecer si un yacimiento es de aceite negro, aceite volátil, gas y condensado, gas húmedo o gas seco son, la composición de la mezcla y las condiciones de presión y temperatura en el yacimiento.

Los yacimientos de hidrocarburos se han considerado básicamente de dos tipos; de aceite negro y de aceite volátil. De acuerdo al tipo de yacimiento es la configuración y condiciones de operación para el manejo superficial de los hidrocarburos (Gómez Cabrera J,1997: "APUNTES DE MANEJO DE LA PRODUCCIÓN EN SUPERFICIE", Facultad de Ingeniería, UNAM.) producidos, por ejemplo, para el manejo superficial de yacimientos de aceite volátil, se requiere, además de los sistemas usados para aceite negro (el cual no tiene gran desprendimiento de gas), el sistemas de rectificación, deshidratación y endulzamiento de gas, y para la recuperación, deshidratación y endulzamiento de condensados.

1.2.1. Sistema de producción para aceite volátil. Fig.1.1.

1. Se recibe en un cabezal o múltiple de recolección.
2. Se envía a un sistema de separación gas-aceite.
3. El aceite pasa a estabilización, deshidratación y desalado.
4. Después es bombeado a refinación o a una terminal marítima para exportación.
5. El gas pasa a enfriamiento, a rectificación, recuperación de condensados, deshidratación y endulzamiento, luego es enviado a una planta petroquímica, y a centros de consumo o a exportación.
6. Los condensados (butanos y gasolinas) se deshidratan y endulzan para enviarlos a refinería.

En la separación de los hidrocarburos, el equipo utilizado es el separador, que puede ser de dos fases (líquido y gas) o tres fases (aceite gas y agua). Los separadores de tres fases separan la fase líquida del gas y la fase líquida es separada en aceite y agua no emulsionada en el aceite. Para separar el agua del aceite, es mejor usar equipos conocidos como eliminadores de agua.

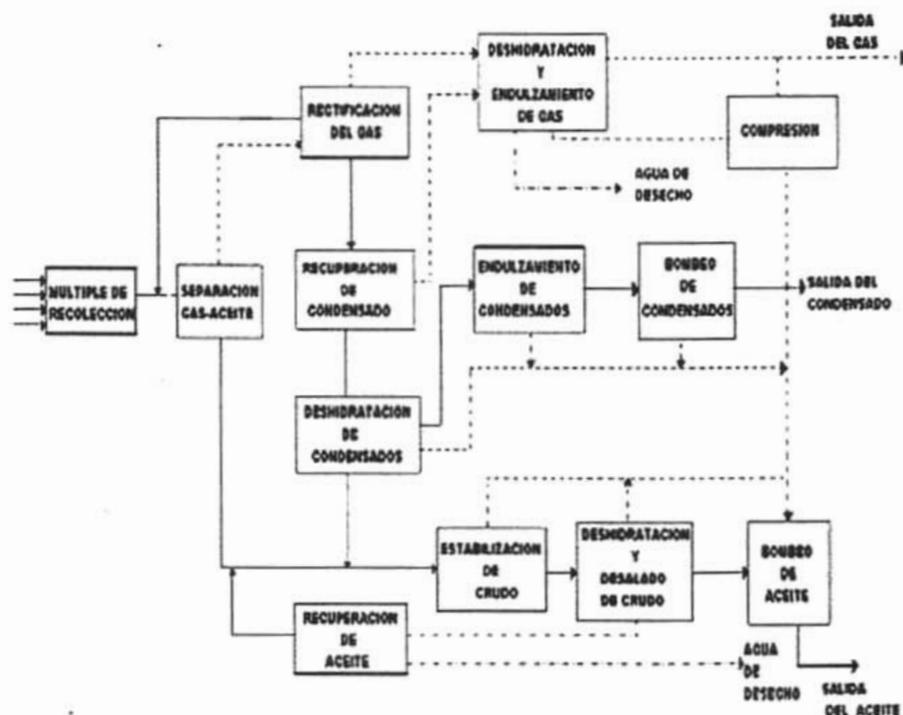


FIGURA 1.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN PARA ACEITE VOLÁTIL

Existen tres tipos de separadores bifásicos, de acuerdo a su forma se clasifican en: verticales, horizontales, y esféricos. Para establecer las condiciones de separación más apropiadas, de acuerdo con las características de los fluidos producidos se considera:

- a) Tipo, tamaño y dispositivos internos del separador.

- b) Tiempo de residencia del aceite.
- c) Etapas de separación.
- d) Presión y temperatura de operación.
- e) El lugar de instalación de los separadores.

La selección de las condiciones de separación depende de los objetivos de producción establecidos:

- 1.-Alta eficiencia en la separación.
- 2.-Mayores ritmos de producción.
- 3.-Mayor recuperación de aceite.
- 4.-Menores costos por compresión.
- 5.-Aceite y gas estabilizados.

El diseño de un sistema de separación gas-aceite depende principalmente de la Presión de Vapor Reid máxima permisible, así como de la composición de los fluidos producidos y la temperatura.

Para aceites volátiles y condensados se recomienda el uso de torres estabilizadoras o calentadores para alcanzar la Presión de Vapor Reid requerida. La presión de vapor de un aceite puede disminuirse aumentando la temperatura del separador o reduciendo la presión de operación. Para estabilizar un aceite volátil, por ejemplo, se hace con la adición de un simple cambiador de calor, el volumen de aceite producido se reduce ligeramente, mientras aumenta el volumen de gas natural, gas propano licuado y gasolinas, dando mayor rendimiento económico por barril de aceite extraído.

Un estabilizador es una columna fraccionadora, donde se vaporizan los componentes ligeros, obteniéndose en el fondo el aceite o condensado estabilizado. Estos equipos realizan esencialmente las mismas funciones que un tren de separadores operando en serie con pequeños decrementos de presión. Mediante el empleo de estabilizadores se obtienen producciones de líquidos comparables en volúmenes y propiedades con las que se recuperan empleando de cuatro a seis etapas de separación.

El aceite crudo que proviene del yacimiento a la boca del pozo, es enviado por una tubería de escurrimiento (descarga) a la central de recolección (batería) en donde se separa, mide, almacena y una vez que se ha acumulado una cantidad conveniente, se bombea por un oleoducto hasta la refinería para su proceso industrial o bien para su exportación.

El número de tanques de almacenamiento depende principalmente, de la producción diaria que se maneja en la batería. El objetivo de las centrales de almacenamiento de hidrocarburos parece ser, a primera vista, tan simple como recibir hidrocarburos para almacenarlos durante el tiempo que se requiera para su distribución. Sin embargo debido a la gran volatilidad de la mayor parte de sus componentes, este objetivo no puede cumplirse satisfactoriamente o plenamente a menos que se disponga de los elementos adecuados para impedir las pérdidas por evaporación que se producen durante el llenado o vaciado y permanencia de los hidrocarburos almacenados en los tanques. Esto da como resultado una variación considerable en la cantidad del volumen recibido con respecto al volumen para entregar.

Después del tratamiento dado al crudo en una batería de separación, este es almacenado y posteriormente bombeado para su proceso industrial o exportación, comercializándolo así a otras subsidiarias o al extranjero.

1.3 ESTABILIZACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO

Con el fin de que el aceite no experimente pérdidas por evaporización se requiere estabilizarlo. El aceite se estabiliza ajustando su presión de vapor, de modo que esta sea menor que la presión atmosférica a la temperatura máxima esperada.

El grado de estabilización de un líquido se acostumbra expresar mediante su presión de vapor Reid (PVR). Esta presión no es la presión de vapor verdadera (PVV), que es la que ejerce sobre un líquido su vapor, en condiciones de equilibrio, a una temperatura dada.

Para determinar la presión de vapor Reid de un aceite se realizan pruebas a una temperatura de 100 °F y esta es siempre menor que la presión de vapor verdadera, mientras menor sea la presión de vapor Reid mayor será el grado de estabilización del crudo.

ACEITE ESTABILIZADO (Garaicochea Petrirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.) es el aceite que ha sido sometido a un proceso de separación con el objeto de ajustar su presión de vapor y reducir su vaporización al quedar expuesto, posteriormente, a las condiciones atmosféricas.

CAPITULO II

PROCESOS CONVENCIONALES DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO

CAPITULO II

En este capítulo se hace una descripción general de los métodos convencionales de estabilización, puntualizando su principio de operación, los cuales han tenido grandes progresos desde la instalación de la primer batería de separación, hasta las modernas instalaciones de estabilización de petróleo crudo.

La tecnología de estabilización de crudo empleada en la industria petrolera nos da como resultado una gran variedad de procesos que pueden ser mecánicos o químicos. Cada proceso varía en su funcionamiento por el principio de operación y equipo que utiliza, reflejándose esto en la eficiencia de estabilización que se obtiene en cada proceso así como en el costo de operación.

Los principales métodos de estabilización para el petróleo crudo son: separación por destilación (torre estabilizadora), separación multietapa, transferencia de calor y estabilización con energía ultrasónica. En la actualidad se cuenta con múltiples métodos para la estabilización de petróleo crudo, pero debido a su alto costo de operación y mantenimiento no son rentables. Por lo que en este capítulo se mencionan sólo los métodos de estabilización más representativos y utilizados en la industria petrolera.

La estabilización por torre de destilación se menciona brevemente en este capítulo por ser un método con buenos resultados de estabilización en el tratamiento de condensados. Su costo de operación es mayor comparado con otros métodos, ya que, por ejemplo se necesitaría tener una torre muy grande para poder manejar volúmenes considerables de aceite crudo, entre otras desventajas. La estabilización por variación de temperatura, ha dado buenos resultados por lo que también se presentan en este capítulo. El sistema de estabilización por ultrasonido se menciona en forma breve ya que justamente es el método objeto de esta tesis, por lo que se presentará con detalle en los capítulos subsecuentes.

2.1 SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN CON TORRE DE DESTILACIÓN.

La separación de mezclas en sus componentes puede efectuarse mediante algún proceso físico, por ejemplo cuando se vaporiza parcialmente una mezcla

líquida de dos o más componentes, y éstos tienen diferentes volatilidades; dichas diferencias pueden ser la base para separar uno o varios componentes de la mezcla. Este método recibe el nombre de destilación cuando los componentes vaporizados se recuperan por condensación. Para que haya una destilación, los componentes de la mezcla deben de tener diferentes temperaturas de ebullición y consecuentemente diferente presión de vapor.

La destilación es en lo primero en que pensamos cuando se tiene la necesidad separar y purificar los componentes de una mezcla líquida y es el método más usual. Los métodos de destilación más usuales en la industria del petróleo son las llamadas torres o columnas de destilación. Fig. 2.1

2.1.1 Principio de operación.

En esencia la operación que se lleva a cabo en una torre de destilación (Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.), es un proceso de dos pasos; una corriente de vapor que asciende y una corriente de líquido que fluye hacia abajo. Los componentes ligeros y pesados son separados de la mezcla de hidrocarburos. Cada división o paso de separación de la torre consiste en un entrepaño metálico llamado plato. La carga o alimentación entra por la parte media de la torre, desciende a través de los platos hasta el plato inferior en el fondo de la torre, donde fluye hacia el calentador, el calor aplicado vaporiza el líquido y los vapores son regresados a la torre entrando a la altura de la charola más baja por medio de los elevadores, burbujea a través de las cucharas, haciendo que hierva y se vaporice parte del líquido contenido en este plato.

Del mismo modo, los vapores producidos en este plato suben al segundo plato, y los que salen de este, ascienden al inmediato superior; provocando una vaporización parcial del líquido en cada plato.

Conforme los vapores ceden calor al líquido, algunos de los vapores más pesados se condensan y pasan a formar parte del líquido, de tal manera que a medida que ascienden, los vapores se irán desprendiendo de los componentes pesados y así, el líquido extraído por el fondo de la columna, estará altamente concentrado en componentes pesados. Este producto podrá hacerse más puro agregando plato a la sección de agotamiento de la torre.

La corriente de vapores que salen de la sección de agotamiento de la torre, es tan pura en componentes ligeros como el producto del fondo lo es en

componentes pesados. El grado de pureza de los componentes ligeros puede aumentarse agregando platos a la sección rectificadora.

Los vapores que salen por el domo de la torre son condensados; parte de este condensado es extraído como producto destilado y la otra parte es regresado a la torre como reflujo, introduciéndose por el plato del domo. Puesto que el reflujo es regresado frío, además de controlar la temperatura del domo, permite mantener el nivel del líquido en los platos superiores.

Si no hay nada que distribuya el reflujo uniformemente a lo largo del plato, todo el reflujo será derramado en un solo lugar, ocasionando que el contacto entre los vapores y el líquido sea pobre lo cual disminuye considerablemente la eficiencia del plato. Para evitar esto la mayoría de las torres cuentan con un accesorio que permite distribuir uniformemente el reflujo en toda la superficie del plato del domo.

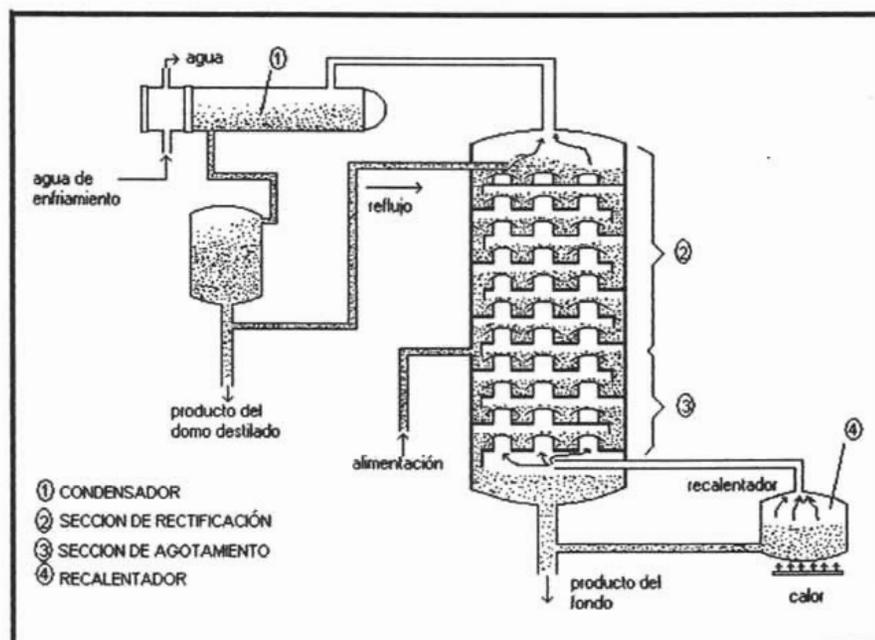


FIGURA 2.1 TORRE DE DESTILACION.

2.1.2 Accesorios de un equipo de destilación.

1.- Accesorios internos de la torre de destilación.

- a) **Torre.** Está dividida en pasos de separación y consiste en entrepaño metálico llamado plato y cada plato equivale a hacer la misma función de un evaporador.
- b) **Plato.** Éstos accesorios consisten en los conductos verticales que se proyectan hacia arriba, llamados chimeneas o elevadores cubiertos por las campanas de burbujeo, que mantienen el nivel de líquido en el plato.
- c) **Número de platos, altura y diámetro de una torre.** Para una destilación eficiente deberá usar el número correcto de platos y deberán estar convenientemente espaciados, con esta se evitara el arrastre en los vapores ascendentes que ocurren cuando pequeñas gotas de líquido suspendido en los vapores, son elevados al plato inmediato superior.
- d) **Elevador o chimenea.** Su función es permitir que los vapores asciendan al plato superior.
- e) **Campana.** Su función es permitir que los vapores calientes de un plato burbujeen en el líquido en ebullición contenido en el plato inmediato superior.
- f) **Carga o alimentación.** Entra a la torre por la parte superior de la sección de agotamiento y la parte inferior de la sección de rectificación.
- g) **Empaque.** Algunas torres (torres empacadas) utilizan material cerámico u otro resistente a la corrosión, en lugar de platos. Empleados principalmente para tratamiento de vapores.
- h) **Sección de rectificación.** Elabora un producto destilado con alta concentración en componentes ligeros.
- i) **Sección de agotamiento.** Producirá en el fondo de la torre, un producto con alta concentración en componentes pesados.

2.- Cambiador de calor.

El cambiador de calor suministra el calor para la ebullición de los componentes ligeros de la mezcla de hidrocarburos. El tipo de cambiador dependerá de la cantidad de calor requerido en la unidad de destilación.

3.- Condensador de reflujo.

El condensador enfría el gas de la etapa de destilación hasta la temperatura ambiente. El condensador puede ser de tipo aereal, o de tipo tubo enfriado con agua.

4.- Enfriador de aceite.

Es usado para enfriar la temperatura del condensado estable producido en el fondo de la torre hasta la temperatura ambiente. Usual mente es el mismo tipo que el condensador de reflujo.

5.- Precalentador.

Es un cambiador de calor en el cual el calor producido en el fondo es transferido al pie de la corriente. Normalmente se usa un tubo tipo U de acero al carbón.

6.- Acumulador de reflujo.

Es usualmente un separador vertical que segrega la corriente, partiendo el reflujo de condensado en el gas y liquido. El acumulador es de acero al carbón bajo especificación.

7.- Bomba de reflujo.

El hidrocarburo líquido que cae al fondo del acumulador del reflujo es bombeado al rectificador con la bomba de reflujo. Esta es usualmente de tipo centrífugo manejada por un motor eléctrico.

2.1.3 Variables de operación que afectan la eficiencia de la estabilización.

El éxito de la operación del equipo de destilación, depende del conocimiento que se tenga acerca de lo que sucede dentro de la torre, debido a que una eficiente destilación o fraccionamiento no se logra sin el razonamiento lógico de la presión, la temperatura y las cantidades de flujo que afectan al proceso y definen el tipo de productos que se obtienen. Puesto que son varios los factores que afectan la operación, será conveniente considerar los principales en orden de importancia:

1.- Variación de Temperatura.

La composición de un producto determina su temperatura de ebullición y la cantidad que de este puede obtenerse de una carga determinada.

Con temperaturas altas se obtienen productos pesados y a temperaturas bajas se obtienen productos ligeros. Si la temperatura del domo es muy alta, el producto del mismo será muy pesado y se obtendrá en mayor cantidad. Si por el contrario la temperatura del domo es muy baja, el producto del mismo será muy ligero y se obtendrá en cantidad mayor. Así mismo, si la temperatura del fondo es muy alta el producto será muy pesado y se obtendrá menor cantidad de él. (Así mismo una temperatura alta en la carga, envía componentes pesados a la sección de rectificación de la torre. Si por el contrario la temperatura de la carga es muy baja, se vaporizará menos material en el plato de alimentación y este material no vaporizado, descenderá a la sección de agotamiento). Generalmente temperaturas altas, producen rendimientos altos en el domo y bajos en el fondo.

La cantidad de reflujo que se inyecta en el domo de la torre, también determina la temperatura de la misma. Al aumentar el reflujo de la torre tiende a enfriarse y si éste disminuye la torre se calienta.

2.- Variación de Presión.

Uno de los usos de la presión en una torre destiladora es cambiar el punto de ebullición del líquido. Si la presión se reduce, los líquidos hierven a temperaturas más bajas.

Por ejemplo, los aceites pesados necesitan temperaturas altas para separarse de las fracciones más pesadas. A la presión atmosférica y a esta temperatura puede haber desintegración. Sin embargo, si la presión

se reduce a menos de la atmosférica (vacío), las fracciones más pesadas hierven a temperaturas más bajas.

La presión también puede alterar el volumen de material que maneja la torre. Puesto que el vapor puede ser comprimido, un aumento de la presión disminuye el volumen que el vapor ocupa en este caso la torre debe estar hecha para resistir presiones relativamente altas. Estos cambios en la presión pueden dañar los platos además de alterar los puntos de ebullición, dando lugar a que se vea afectada la composición de los productos.

3.- Variación de flujo.

Generalmente si se aumenta o disminuye la carga este cambio afectará la composición de los productos y las temperaturas de la torre ya que la alimentación es una fuente de calor así como una fuente de material. Así mismo, al variar el flujo del domo, cambiará la temperatura del domo.

Cuando la torre está funcionando normalmente, todo el material que entra como alimentación, saldrá de la torre como productos; del domo y del fondo.

Por otra parte, toda la energía suministrada a la torre en forma de calor; será igual al calor que sale de la misma. El proceso donde se agrega calor para subir su temperatura (calor latente) se llama vaporización, y el proceso donde se quita calor latente se llama condensación. El recalentador vaporiza el material ligero y regresa los vapores a la torre, el recalentador suministra la mayor parte del calor latente.

El calor sale de la torre con los productos, y el agua de enfriamiento del condensador lo retira del sistema. Así pues, la cantidad de calor latente depende de la cantidad de vapor condensado en el condensador. La cantidad de calor sensible retirado de la torre, depende de la cantidad y la temperatura de los productos que salen.

2.2 ESTABILIZACIÓN POR PROCESO MULTITAPA.

La estabilización de fluidos, es la separación más básica y necesaria en el procesamiento crudo-gas, una de las piezas fundamentales son los equipos utilizados en producción. El término "separador crudo-gas", "separador",

“trampa” y “separador por etapas”, (Gómez Cabrera J,1997: “APUNTES DE MANEJO DE LA PRODUCCIÓN EN SUPERFICIE”, Facultad de Ingeniería, UNAM.) se refieren a separadores crudo-gas convencionales, en terminología petrolera se designa a un recipiente a presión utilizado para la separación de fluidos producidos por un pozo, en este caso hidrocarburos en fase líquida y gaseosa. No hay un criterio único para establecer las condiciones de operación del equipo más adecuadas.

2.2.1 Principio de operación.

La mezcla de petróleo crudo y gas que se obtienen de los pozos entra a la etapa de separación de alta presión donde se pretende alcanzar un equilibrio vapor-líquido correspondiente a las condiciones de presión temperatura de esta etapa.

El líquido obtenido pasa a la etapa de separación de presión intermedia y subsecuentemente a la de baja presión, para que posteriormente, el líquido descargado por esta última etapa de separación sea almacenado en un tanque y bombeado a una central de tratamiento y distribución.

El gas del separador de alta presión pasa por un enfriador mecánico (sólo aire) el cual le reduce la temperatura hasta una cercana a la temperatura ambiente, para entrar a un rectificador de alta presión. Este gas ya rectificado pasa por un medidor totalizador y uno de envío con la finalidad de obtener por diferencia el flujo enviado al quemador, para después ser enviado a la planta petroquímica.

La corriente de gas que sale del separador de presión intermedia después de pasar por enfriamiento mecánico entra a su respectivo rectificador, en donde ya rectificado se mide en dos ocasiones (totalizador y envío) en forma similar al de alta presión, y entra a un paso de compresión para suministrarle la energía suficiente para reintegrarlo a la corriente de gas proveniente de la etapa de alta presión. El gas que abandona el separador de baja presión, después de ser medido pasa a un sistema de compresión, el cual adiciona la energía necesaria al gas para poderlo integrar a la corriente de gas de alta presión, ya antes mencionada.

Los condensados generados por el enfriamiento del gas, obtenidos de los rectificadores de alta presión, presión intermedia, presión intermedia en compresión, y de las etapas de rectificación, correspondientes al sistema de compresión de gas de baja presión, entran a un separador donde se puede

eliminarse el agua que contenga en caso de tener un separador trifásico, mientras que el gas es reintegrado a la corriente de gas de baja presión y el condensado es estabilizado, de donde es enviado ya sea a una planta petroquímica o alguna otra instalación para su aprovechamiento.

2.2.2. Descripción de un separador.

Un separador consta de las siguientes secciones:

1.- Sección de separación inicial o primaria.

La separación en esta sección se realiza mediante un cambio de dirección de flujo. Este cambio se puede efectuar con una entrada tangencial de los fluidos al separador o bien instalando una placa desviadora a la entrada, con éstas dos formas se le induce una fuerza centrífuga al flujo con la que se separan grandes volúmenes de líquido.

2.- Sección de acumulación por gravedad o secundaria.

Esta sección se diseña normalmente para separar las gotas del líquido de la corriente de gas utilizando la fuerza de gravedad. Consiste de una parte del recipiente a través de la cual, el gas se mueve a una velocidad relativamente baja, con muy poca turbulencia. En algunos diseños se usan aletas direccionales para reducir la turbulencia. Estas aletas además sirven como colectoras de líquido y su uso reduce la distancia que deben recorrer las gotas para caer y separarse del flujo del gas.

3.- Sección de extracción de niebla.

Aquí es donde se lleva a cabo la separación del flujo de gas, las gotas pequeñas de líquido que no se lograron eliminar en la sección primaria y secundaria del separador. En esta sección del separador se utilizan el efecto de choque y la fuerza centrífuga como mecanismo de separación. Mediante este mecanismo se logra que las pequeñas gotas de líquido, se colecten sobre una superficie donde se acumulan y forman gotas más grandes, que se drenan a través de un conducto a la sección de acumulación de líquido o bien caen contra la corriente de gas a la sección de separación primaria.

4.- Sección de almacenamiento de líquido.

En esta sección se almacena y descarga el líquido separado de la corriente de gas. Esta parte del separador debe tener la capacidad suficiente para manejar los posibles baches de líquido que se pueden presentar en una operación normal. Además debe de tener la instrumentación adecuada para controlar el nivel de líquido en el separador. Esta instrumentación está formada por un controlador y un indicador de nivel, un flotador y una válvula de descarga. La sección de almacenamiento de líquido debe de estar situada en el separador, de tal forma que el líquido acumulado no sea arrastrado por la corriente de gas que fluye a través del separador.

2.2.3. Clasificación de los separadores.

Se acostumbra designar separadores convencionales a los separadores de dos fases en cualquiera de sus tres tipos: verticales, horizontales y esféricos. Los separadores horizontales pueden estar formados por un tanque horizontal, o bien por dos colocados uno encima del otro. A los primeros se les conoce como de simple barril, y a estos últimos como de doble barril.

1.- Separadores Verticales, (Vea la Fig. 2.2).

Ventajas:

- Es fácil mantenerlos limpios cuando se manejan líquidos con alto contenido de lodo, arena o materiales sólidos.
- El control de nivel de líquido no es crítico, puesto que se puede emplear un flotador vertical, logrando que el control del nivel sea más sensible a los cambios.
- Debido a que el nivel del líquido se puede mover en forma moderada, son muy recomendables para flujos de pozos que producen por bombeo neumático, con el fin de manejar baches imprevistos de líquido que entren al separador.
- Hay menor tendencia a revaporización de líquidos.

Desventajas:

- Son más costosos que los horizontales.
- Son más difíciles de instalar que los horizontales.
- Se necesita un diámetro mayor que el de los horizontales para manejar la misma cantidad de gas.

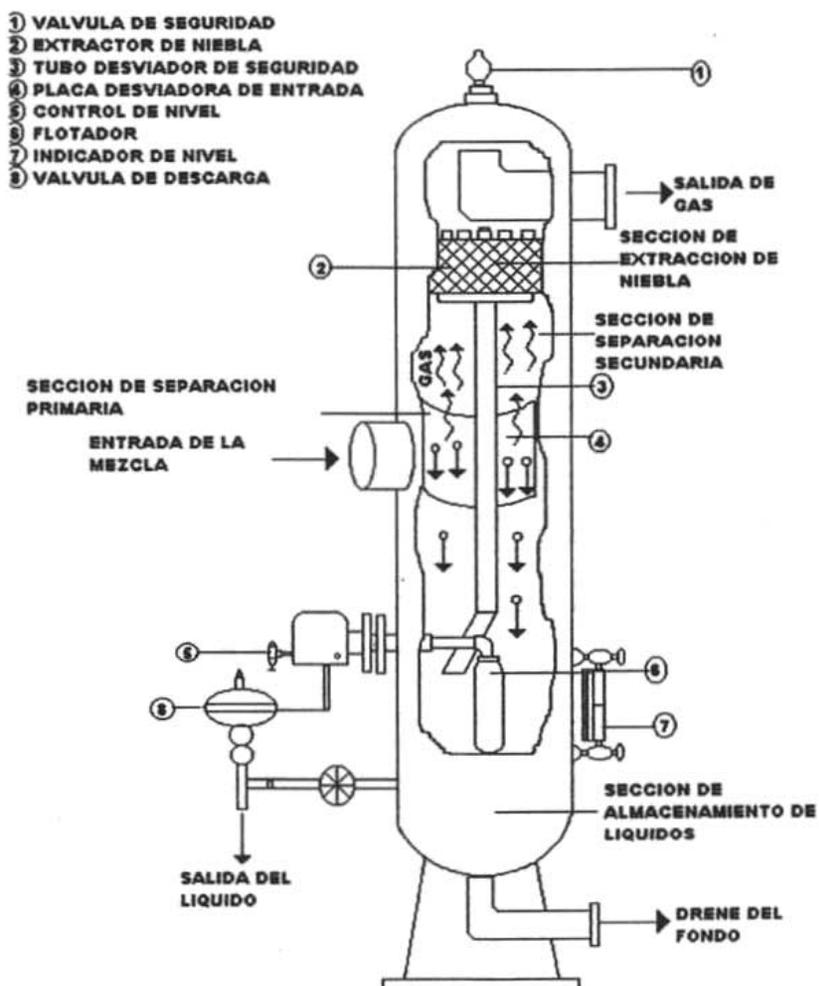


FIGURA 2.2. ESQUEMA DE UN SEPARADOR VERTICAL.

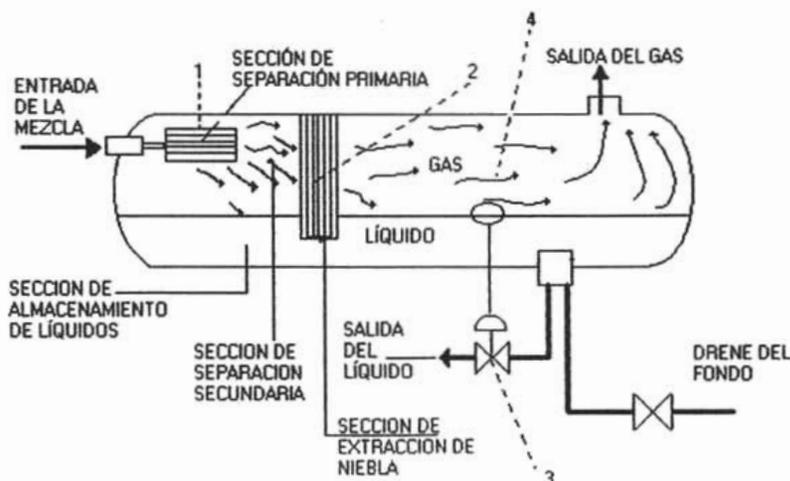
2.- Separadores Horizontales, (Vea Fig. 2.3).

Ventajas:

- Tienen mayor capacidad para manejar gas que los verticales.
- Son más económicos que los verticales.
- Son más fáciles de instalar que los verticales.
- Son más adecuados para manejar aceite con alto contenido de espuma. Para esto, donde queda la interfase gas-líquido, se instalan placas rompedoras de espuma.

Desventajas:

- No son adecuados para manejar flujos de pozos que contienen materiales sólidos como arena o lodo, pues es difícil limpiar este tipo de separadores.
- El control del nivel de líquido es más crítico que en los separadores verticales.



- 1.- PLACA DESVIADORA
- 2.- EXTRACTOR DE NIEBLA
- 3.- VÁLVULA DE DESCARGA DE LÍQUIDO
- 4.- FLOTADOR

FIGURA 2.3. ESQUEMA DE UN SEPARADOR HORIZONTAL.

3.- Separadores Esféricos.

Ventajas:

- Son más baratos que los verticales y horizontales.
- Son más compactos que los verticales y los horizontales, por lo que se usan en plataformas costa afuera.
- Son más fáciles de limpiar que los separadores verticales.
- Los diferentes tamaños disponibles, los hacen el tipo más económico para instalaciones individuales de pozos de alta presión.

Desventajas:

- Tienen un espacio de separación muy limitado.

2.2.4. Mecanismos de separación.

La separación de mezclas de gases y líquidos, se logra mediante una combinación adecuada de los siguientes factores: gravedad, fuerza centrífuga y choque.

1.- Separación por gravedad.

Es el mecanismo de separación que más se utiliza, debido a que el equipo que se utiliza es muy simple. Cualquier sección ampliada en una línea de flujo, actúa como asentador, por gravedad, de las gotas de líquido suspendidas en una corriente de gas. El asentamiento se debe a que se reduce la velocidad de flujo.

En los separadores el asentamiento por gravedad tiene lugar principalmente en la sección secundaria, que se conoce también como sección de asentamiento por gravedad.

Si el flujo es vertical hacia arriba, como en los separadores verticales, las partículas de líquido que se van a separar caen a contraflujo del gas. Estas partículas de líquido que descienden por la acción de la gravedad se aceleran, hasta que la fuerza de arrastre se balancea con la fuerza gravitacional. Después de este momento, las partículas continúan cayendo a una velocidad constante, conocida como velocidad de asentamiento o velocidad terminal.

La velocidad de asentamiento calculada para una gota de líquido de cierto diámetro, indica la velocidad máxima que debe tener el gas, para permitir que partículas de este diámetro o mayor se separen.

2.- Separación por fuerza centrífuga.

La fuerza centrífuga que se induce a las partículas de líquido suspendidas en una corriente de gas, puede ser varios cientos de veces mayor que la fuerza de gravedad que actúa sobre las mismas partículas. Este principio mecánico de separación se emplea en un separador, tanto en la sección de separación primaria como en algunos tipos de extractor de niebla, por ejemplo en el extractor tipo ciclónico.

Las partículas de líquido colectadas en las paredes de un extractor de niebla tipo ciclónico, difícilmente son arrastradas por la corriente de gas. Sin embargo la velocidad del gas en las paredes del tubo ciclónico, no debe de ser mayor de un cierto valor crítico.

3.- Separación por choque.

Este mecanismo de separación es, tal vez, el que más se emplea en la eliminación de las partículas pequeñas de líquido suspendidas en una corriente de gas. Las partículas de líquido que viajan en el flujo de gas, chocan con obstrucciones donde quedan adheridas.

La separación por choque se emplea principalmente en los extractores de niebla tipo veleta y en los de malla de alambre entretejido (malla eliminadora de niebla).

2.2.5. Principales factores que afectan la eficiencia de separación de gas-aceite

A continuación se describen, en orden de importancia, los principales factores que afectan la eficiencia de la separación, de gas- líquido.

1.- Tamaño de las partículas de líquido.

El tamaño de las partículas suspendidas en el flujo de gas, es un factor importante en la determinación de la velocidad de asentamiento en la separación por gravedad y en la separación por fuerza centrífuga. También es

importante en la determinación de la distancia de paro, cuando la separación es por choque.

La velocidad promedio del gas en la sección de separación secundaria, corresponde a la velocidad de asentamiento de una gota de líquido de cierto diámetro, que se puede considerar como el diámetro base. Teóricamente todas las gotas con diámetro mayor que el base, deben ser eliminadas. En realidad lo que sucede es que separan partículas más pequeñas que el diámetro base, mientras que algunas más grandes en diámetro no se separan. Lo anterior es debido a la turbulencia del flujo, y a que algunas de las partículas del líquido tienen una velocidad inicial mayor que la velocidad promedio e flujo de gas.

La separación en flujo horizontal también está sujeta a los mismo efectos.

El tamaño en las partículas de líquido que se forman en el flujo del líquido y gas, cuando no hay agitaciones violentas, es lo suficientemente grande para lograr una buena eficiencia con los separadores.

2.- Distribución del tamaño de las partículas del líquido y el volumen del líquido que entra al separador.

Estos aspectos están íntimamente ligados en la eficiencia de la separación. Considérese que un separador se instala, para separar un volumen de líquido de 2000 galones por cada millón de pie cúbico de gas.

De este volumen de líquido, 0.5 galones están formados por partículas menores de 10 micras. Si el separador tiene una eficiencia de 80% para separar partículas menores de 10 micras entonces su eficiencia total será de casi 100 %. Sin embargo, si este mismo separador se utiliza en una corriente de gas, donde el contenido de líquido es de 20 galones por millón de pie cúbico todo formado por partículas menores de 10 micras, la eficiencia total de separación será de 80% y habrá un arrastre de líquido en el flujo de gas de 4 galones por millón de pie cúbico de gas. Así aunque el separador funcionará bien no sería el adecuado. De lo anterior se concluye que, en la sección del equipo de separación para un determinado problema, se deben considerar como aspectos importantes, la distribución del tamaño de las partículas y el volumen de líquido que se va a separar.

3.- Velocidad del gas.

Generalmente los separadores se diseñan en tal forma que las partículas de líquidos mayores de 100 micras, se deben separar del flujo de gas en la sección de separación secundaria, mientras que las partículas más pequeñas en la sección de extracción de niebla.

Cuando se aumenta la velocidad del gas a través del separador, sobre un cierto valor establecido en su diseño, aunque se incrementa el volumen de gas manejado no se separan totalmente las partículas de líquido mayores de 100 micras en la sección de separación secundaria. Con esto se ocasiona que se inunde el extractor de niebla y, como consecuencia que haya arrastre repentinos de líquido en el flujo de gas que sale del separador.

4.- Presión de separación.

Es uno de los factores más importantes en la separación, desde el punto de vista de la recuperación de líquidos. Siempre existe una presión óptima de separación para cada situación en particular.

En ocasiones al disminuir la presión de separación, principalmente en la separación de gas y condensado, la recuperación de líquidos aumenta. Sin embargo, es necesario considerar el valor económico del incremento de volumen de líquidos, contra la compresión extra que puede necesitarse para transportar el gas.

La capacidad de los separadores también es afectada por la presión de separación. Al aumentar la presión, aumenta la capacidad de gas y viceversa.

5.- Temperatura de separación.

En cuanto a la recuperación de líquidos, la temperatura de separación interviene de la siguiente forma a medida que disminuye la temperatura de separación, se incrementa la recuperación de líquido en el separador.

A una temperatura de separación de 0° F, la recuperación de líquidos en el separador es de aproximadamente 5000 galones de pie cúbico de gas, mientras que el volumen de líquidos que se recupera en el tanque de almacenamiento es del orden de 2000 galones por millón de pie cúbico.

Así pues, es necesario considerar que aunque se tiene la máxima recuperación de líquidos en el separador a 0° F, de los 5000 galones por millón de pie cúbico se evaporan en el tanque de almacenamiento 3000. Este vapor generalmente se libera a la atmósfera, por lo que se ocasionan grandes pérdidas.

Otros aspectos que hay que considerar para utilizar baja temperatura de separación, son los siguientes:

- a) La separación baja temperatura necesita equipo adicional de enfriamiento.
- b) Se presentan otros problemas de operación, tales como la formación de hidratos.

6.- Densidad del líquido y del gas.

La densidad del líquido y el gas afectan la capacidad de manejo de gas en los separadores. La capacidad de un separador, es directamente proporcional a la diferencia de densidad del líquido y del gas e inversamente proporcional a la densidad del gas.

7.- Viscosidad del gas.

El efecto de la viscosidad del gas en la separación, se puede observar de las fórmulas para determinar la velocidad del asentamiento de las partículas de líquido. La viscosidad del gas utiliza el parámetro número de Reynolds, con el cual se determina el valor del coeficiente de arrastre. De la ley de Stokes, utilizada para determinar la velocidad de asentamiento de partículas de cierto diámetro se deduce que a medida que aumenta la viscosidad del gas disminuye la velocidad de asentamiento y por lo tanto, la capacidad de manejo de gas en el separador.

2.3 ESTABILIZACIÓN POR TRANSFERENCIA DE CALOR.

Las ventajas que se obtienen cuando se utiliza el sistema de separación por transferencia de calor (Clavel López J. y Hernández Rojas G, 1996: "SIMULACIÓN Y ANALISIS DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO", Instituto Mexicano del Petróleo, México, D. F.), en lugar de un sistema de separación común, son las siguientes:

- a) Se obtiene un aceite más estable, con un proceso similar al de una destilación.

- b) Se reduce el contenido de agua en el gas y por lo tanto, también disminuye el punto de condensación (rocío) del vapor de agua contenido en el gas.

El incremento de la recuperación de líquidos puede pagar en un corto tiempo el costo del equipo necesario.

El líquido descargado de la etapa de separación de baja presión, previa al tanque de almacenamiento, pasa por una serie de intercambiadores de calor antes de entrar al separador. El objetivo de los intercambiadores de calor, es provocar un incremento en la temperatura de la corriente de alimentación que entra al separador elevado, la cual permite la liberación de gas contenido en el aceite en esta etapa, evitando con esto que dicha liberación se dé en el tanque de almacenamiento. El vapor obtenido de la separación, después de disminuir la temperatura en un intercambiador de calor y de suministrar la presión requerida, se integra a la corriente de gas descargada en la etapa de separación de baja presión.

Después de separar el gas, y el agua del crudo en la etapa de baja presión, el crudo pasa por etapas de precalentamiento, donde alcanza la temperatura requerida para lograr su estabilización. El calentamiento en esta tercera etapa de transferencia de calor, se logra haciendo pasar a contracorriente el gas caliente comprimido de alta presión, por intercambiadores de calor, posteriormente el aceite calentado entra a un separador de baja presión para separarse y estabilizarse a una PVR requerida (de 6 a 6.5 psia). El aceite aún con la temperatura elevada pasa a contracorriente por el intercambiador de calor para lograr enfriarse adecuadamente y evitar con esto vaporizaciones adicionales en el tanque de almacenamiento.

El vapor liberado en el separador elevado pasa a contracorriente por un intercambiador de calor y después a rectificación, para reintegrarlos a la corriente de gas de baja presión y conducirlo conjuntamente a la estación de compresión. El condensado recuperado en la etapa de rectificación se reincorpora a la corriente que le corresponda.

Una unidad de separación por transferencia de calor consiste de partes similares a un sistema de separación multietapa, la diferencia consiste en que el líquido descargado de la etapa de separación de baja presión, pasa por una serie de intercambiadores de calor antes de entrar al separador.

Para la estabilización del crudo mediante este proceso, es necesario la modificación o sustitución de los separadores de la etapa de baja presión de bifásico (gas-aceite) a trifásico (gas-aceite-agua), par evitar la incrustación de sales contenidas en el agua en los intercambiadores de calor. Se requiere además de equipo, de conexión y de control adecuado de tuberías, válvulas, etc. en ocasiones se utiliza además un equipo de inyección de glicol para proteger al sistema de la formación de hidratos.

2.3.1 Descripción del equipo.

- Sistema de calentamiento de petróleo crudo.
- Horno de calentamiento.

Este equipo se utiliza para elevar la temperatura del petróleo crudo a estabilizar, haciéndolo pasar a través de él, para calentarlo por medio de gas combustible. Una vez elevada la temperatura del aceite, sale a un horno de calentamiento para enviarlo a los cambiadores de calor que se describen a continuación.

2.3.1 Cambiador de calor.

Básicamente el cambiador de calor tiene dos funciones:

- a) La temperatura de la corriente de gas al entrar al serpentín del separador puede disminuir hasta 100° F. Sin embargo, es necesario abatirlo todavía más, por lo que pasa a otro cambiador de calor, donde se enfría por el gas que sale del separador.
- b) El gas frío que sale del separador de baja temperatura es calentado en el cambiador de calor. Con esto disminuye la posibilidad de formación de hidratos en las líneas de transporte de gas.

A pesar de que este sistema de estabilización de petróleo crudo tiene buena eficiencia de separación, requiere de espacios pequeños para su instalación y bajos costos de mantenimiento, su aplicación debe analizarse detalladamente debido a que puede provocar otros problemas como: Incrustación de sales, tanto en tuberías como en los cambiadores de calor, altos contenidos de H₂S en el petróleo crudo, lo que daría problemas para su venta, además que el consumo de energía requerida para su aplicación es alto.

2.4. ESTABILIZACIÓN CON ENERGÍA ULTRASÓNICA.

El siguiente proceso a ser analizado corresponde a una nueva tecnología en desarrollo para obtener mejores resultados en la estabilización de petróleo crudo, los estudios de este tema se iniciaron en 1988 con la búsqueda de soluciones a problemas de la industria petrolera aplicando la energía ultrasónica. Una de las primeras aplicaciones de la energía ultrasónica en México fue el desarrollo de la herramienta sonar SONIMP I, cuyo objetivo alcanzado fue la medición de la geometría de cavidades minadas para el almacenamiento de hidrocarburos en domos salinos.

Para el año de 1993 se desarrollo en el IMP, un proyecto con el propósito de diseñar y construir las herramientas de fondo sonar SONIMP II para determinar las dimensiones, forma y volumen de cavidades a través de las tuberías de revestimiento.

La experiencia en el desarrollo de estas herramientas ultrasónicas, ha permitido el desarrollo de una nueva tecnología para aplicarla en la industria petrolera, desde la utilización de herramientas para registros geofísicos, la aplicación de esta energía para la elevación de fluidos en los pozos y estabilización de crudo.

2.4.1. Sistema ultrasónico para estabilización de petróleo crudo. (Perafán del Valle M. 1998: "SISTEMA ULTRASÓNICO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE CRUDO", Instituto Mexicano del Petróleo México.)

Para la aplicación de este proceso de estabilización de crudo, tanto en las pruebas de diseño e instalación del equipo se tiene que obtener información general de las instalaciones de separación de hidrocarburos donde se aplicará, así como las características y volúmenes de los fluidos manejados. Toda esta información, será especialmente útil para establecer los criterios para la selección de las instalaciones idóneas para aplicar el sistema prototipo.

Es necesario realizar un muestreo de petróleo en una batería de separación, esto con la finalidad de experimentar en laboratorio la estabilización por medios ultrasónicos, haciendo las pruebas para aceites ligeros y pesados.

Las pruebas realizadas en laboratorio y la información general obtenida podrán ayudar a la selección y diseño de un equipo prototipo de campo, donde

se podrá evaluar con mayor detalle la efectividad de la energía ultrasónica para la estabilización de petróleo crudo. Para finalizar, se debe recordar que esta tecnología se está desarrollando desde hace poco tiempo, por lo que los resultados y el dominio no son totalmente controlados. Se deben seguir haciendo pruebas para conocer ampliamente la utilidad que podrá tener este proceso en un futuro reduciendo así, la incertidumbre de su aplicación.

La aplicación de la energía ultrasónica en el petróleo permiten liberar o separar el gas disuelto que contiene dicho petróleo. El grado de eficiencia de la liberación de gas está en función de las propiedades físico-químicas del líquido, tales como viscosidad, tensión superficial, tensión del vapor saturado, densidad y contenido de gas. Por otra parte, los parámetros que determinarán la eficiencia del sistema ultrasónico, son la frecuencia de operación y la intensidad de la energía aplicada asociados con el equipo de suministro de potencia. Sin olvidar que la presión y la temperatura juegan un papel muy importante en la aplicación de esta nueva tecnología para la estabilización de petróleo crudo.

La aplicación de la energía ultrasónica obtuvo en los años de posguerra un intenso desarrollo y se aplicó intensamente en la construcción de maquinaria, en la metalurgia y en otras ramas de la industria. Con el paso del tiempo, se han encontrado con éxito nuevas e importantes aplicaciones con esta técnica, estas son algunas:

- Defectoscopía ultrasónica.
- Emulsificaciones.
- Soldadura de plásticos.
- Limpieza industrial.
- Homogeneización.
- Productos de efectos caloríficos.
- Desgasificación de líquidos.

La capacidad de producir haces de vibración directas de gran enfoque y de concentrar alta energía ultrasónica hacen posible estas aplicaciones. La propagación de las ondas en un medio físico pueden considerarse como la excitación consecutiva de vibraciones en las partículas del medio con relación a la posición inicial de equilibrio, este proceso ondulatorio de baja frecuencia y alta potencia conducen al surgimiento de nuevos fenómenos físicos, tales

como la presión de radiación, flujo acústico y el más importante conocido como cavitación.

La cavitación es el proceso físico-químico que se presenta cuando se excita con alta energía ultrasónica el petróleo crudo, de esta manera se busca generar burbujas de gas y vapor que se desprenderán del líquido, dando como resultado un menor valor de su presión de vapor. Para lograr este fenómeno, es de vital importancia contar con transductores ultrasónicos especialmente diseñados para estos fines, las características principales de estos transductores son el tipo de transductor, forma y material, frecuencia de operación y capacidad de potencia.

CAPITULO III

**TEORÍA DEL ULTRASONIDO EN EL
PROCESO DE ESTABILIZACIÓN DE
PETRÓLEO CRUDO**

CAPITULO III

En este capítulo se presenta la ecuación que se obtuvo por análisis dimensional, que represente la absorción de la energía ultrasónica en una muestra del petróleo crudo no estabilizada.

El ultrasonido como medio de estabilización de petróleo crudo, es un fenómeno complejo, en las que se ven implícitas variaciones de tipo químico y físico del hidrocarburo, por lo que se hace necesario mencionar como antecedente la teoría del ultrasonido.

3.1 TEORÍA DEL ULTRASONIDO.

3.1.1 Ondas.

Una onda (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.) es cualquier perturbación de su condición de equilibrio que se mueve o se propaga de una región del sistema a otra. El sonido, la luz, las olas del mar, la transmisión de radio y televisión, así como los terremotos, son fenómenos ondulatorios.

3.1.2 Movimiento ondulatorio simple.

Las ondas (Paúl A. Triper, 1999: "FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA", Reverté, S.A.) transportan energía y cantidad de movimiento a través del espacio sin transportar materia. En las ondas mecánicas este proceso tiene lugar mediante una perturbación del medio. Cuando una cuerda tensa se rosa, la perturbación se propaga a lo largo de la misma en forma de un pulso ondulatorio. La perturbación en este caso consiste en la variación de la forma de la cuerda a partir de su estado de equilibrio. Su propagación surge de la interacción de cada segmento de cuerda con los segmentos adyacentes. Los segmentos de la cuerda (el medio) se mueven en dirección perpendicular a la cuerda y por lo tanto perpendiculares a la dirección del movimiento del pulso.

3.1.3 Ondas transversales y longitudinales.

El primer tipo de onda en que la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación se denomina **onda transversal**. Figura.3.1.

El segundo tipo de onda en que la perturbación es paralela a la dirección de propagación se denomina **onda longitudinal**. Figura.3.2.

El movimiento tanto transversal como longitudinal (Paúl A. Triper, 1999: "FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA", Reverté, S.A.) se puede dar en algunas ondas al mismo tiempo. Un ejemplo son las ondas en la playa. Si se pone a flotar un cuerpo en el océano para marcar el paso de una onda, se moverá, hacia arriba y hacia abajo, y por otro lado observaremos que se acerca y se aleja de la playa, al hacerlo describe una trayectoria casi circular.



FIGURA 3.1 PULSO DE ONDA TRANSVERSAL EN UN MUELLE

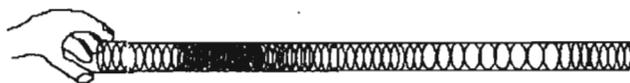


FIGURA 3.2 PULSO DE ONDA LONGITUDINAL EN UN MUELLE

3.1.4 Ondas periódicas.

La onda transversal en una cuerda estirada es un ejemplo de un pulso de onda. La mano sacude la cuerda una vez, ejerciendo una fuerza transversal sobre ella. El resultado es un sólo pulso que viaja a lo largo de la cuerda. La tensión de la cuerda restablece su forma recta una vez que el pulso ha pasado.

Ocurre una situación más interesante cuando imprimimos al extremo libre de la cuerda un movimiento repetitivo, o periódico. Entonces, cada partícula de la cuerda tendrá un movimiento periódico al propagarse la onda, y tendremos una onda periódica (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.).

Supongamos que se hace vibrar periódicamente un extremo de una cuerda tensa en una dirección transversal con movimiento armónico simple de amplitud A , frecuencia f , la distancia entre dos máximos sucesivos (o entre dos puntos sucesivos en fase) es la longitud de onda de la onda y se designa por λ . Como la forma de la onda, que se propaga con velocidad constante c , avanza una distancia igual a una longitud de onda en el intervalo de tiempo de un periodo, se deduce que $c = f \lambda$. Figura 3.3. Como vemos las ondas periódicas con movimiento armónico simple son espacialmente fáciles de analizar: las llamamos ondas senosoidales.

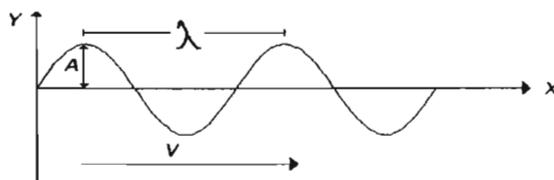


FIGURA 3.3 ONDA PERIÓDICA CON MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE

3.2 ONDAS SONORAS.

La definición más general del sonido es que es una onda longitudinal en un medio. El sonido puede viajar por cualquier gas, líquido o sólido. Las ondas SONORAS (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.) más sencillas son las senosoidales, con frecuencia, amplitud y longitud se define una onda. El oído humano es sensible a ondas en el intervalo de frecuencia de 20 a 20 000 Hz, llamado intervalo audible, pero también usamos el término sonido para ondas similares con frecuencias mayores (**ultrasónicas**) y menores (**infrasónicas**).

Las ondas sonoras suelen dispersarse en todas las direcciones a partir de la fuente de sonido, con una amplitud que depende de la dirección y distancia desde la fuente.

3.2.1 El Ultrasonido.

Es la región de frecuencia situada por encima de la región audible ($> 20,000$ Hz). (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.) Este sonido de alta frecuencia se presta a multitud de usos y aplicaciones. Por ejemplo, las ondas sonoras de frecuencia audible tienen un limitado intervalo de propagación en el agua. En cambio la ondas ultrasónicas pueden recorrer kilómetros y son muy direccionales.

La utilización práctica del ultrasonido (José Antonio Lozano Teruel, 1995: "LAS MATEMÁTICAS, FÍSICA Y QUÍMICA (SONIDOS QUÍMICOS)", Lectores@laverdad.es) esta bastante generalizada. Ejemplos cotidianos son: soldadores y perforadores ultrasónicos; sonares usados en pesca y navegación; examen de materiales industriales mediante ecopulsos; emulsionado de cosméticos y alimentos; uso de ultrasonido para disgregar cálculos renales o biliares; baño de limpieza ultrasónica, como los empleados en joyería. Sin embargo trataremos el efecto del ultrasonido de alta intensidad, fundamentalmente sobre medios líquidos, productores del fenómeno de cavitación.

El fenómeno de cavitación fue observado por primera vez hace unos cien años cuando empezaron a desarrollarse los primeros buques torpederos potentes. Debido al giro a gran velocidad de los propulsores de los torpedos se formaban unas grandes burbujas o cavidades, cuyo colapso posterior venia acompañado de enormes turbulencias, calor y presión ocasionando una rápida erosión en la superficie de los propulsores.

En 1927 se descubrió que las fuentes de ultrasonido, con suficiente intensidad, aplicadas a los líquidos producian también el fenómeno de la cavitación.

Los ultrasonidos poseen una longitud de onda comprendidas entre los 10 centímetros y la centésima del milímetro. Ello significa que su tamaño es muy superior a el de las moléculas, por lo que sus efectos no pueden ejercitarse a través de una interacción física directa entre las ondas y los moléculas que son alcanzadas por ellas. Lo que ocurre es que las ondas de ultrasonido pasan al líquido donde el ciclo de expansión produce una presión tan negativa sobre el líquido que hacen que localmente se separen las moléculas del líquido, creando allí una verdadera cavidad.

3.2.2 La Cavitación.

Es la formación de cavidades (llenas de vapor del líquido contenedor) en el interior de un líquido expuesto a un intenso estímulo ultrasónico. En un medio líquido, las ondas ultrasónicas generadas por un transductor crean ondas de compresión y depresión a altísima velocidad. Estas ondas de compresión y depresión en el líquido originan el fenómeno de la cavitación (José Antonio Lozano Teruel, 1995: "LAS MATEMÁTICAS, FÍSICA Y QUÍMICA (SONIDOS QUÍMICOS)", Lectores@laverdad.es). Durante la fase de la depresión, se crean en el interior del líquido una infinidad de burbujas (cavidades). Durante la segunda fase, la compresión, la enorme presión ejercida sobre estas burbujas hace que estas se compriman, cargándose de energía para repetir la primera fase, o hasta hacerlas colapsar en sí mismas (implosión) con la consiguiente despedida de energía. Esta energía puede manifestarse como calor, o como energía cinética de mezclado a través de jets o chorros.

3.3 INTENSIDAD DEL SONIDO.

Las ondas sonoras viajeras, al igual que todas las ondas viajeras, transfieren energía de una región del espacio a otra. Definimos la intensidad de una onda, I , (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.) como la razón media a la cual la onda transporta energía, por unidad de área a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación. Es decir, la intensidad I , es la potencia media por unidad de área.

3.3.1 Pulso de onda.

Las pulsaciones (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.) son fluctuaciones de amplitud producidas por dos ondas sonoras de frecuencias ligeramente diferentes.

La frecuencia "f", es el número de vibraciones que se realizan en una unidad de tiempo. Si T es el tiempo para una vibración, $f = 1 / T$. Un ciclo es un Hz.

Los niveles de intensidad de sonido se expresan en decibeles (dB). Un decibel es 1/10 de un bel. El decibel es la unidad usual en el nivel de intensidad de sonido. $1 \text{ dB} = 10 \log (I/I_0)$

La velocidad promedio del sonido en el aire es de 343 (m/s).

3.3.2 Efecto Doppler.

Cuando una fuente de sonido y un oyente están en movimiento relativo, la frecuencia de sonido oído por el oyente no es la misma que la frecuencia fuente por ejemplo, cuando un automóvil se acerca tocando el claxon, el tono parece bajar al pasar el automóvil. Este fenómeno se llama efecto Doppler (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.). Sean v_s y v_L las componentes de velocidad a lo largo de esta línea para la fuente y el oyente, respectivamente, relativas al medio. Escogemos como dirección positiva la que va del oyente L a la fuente S. La rapidez del sonido relativa al medio, v , siempre se considera positiva.

Imaginemos primero un oyente L que se mueve con velocidad v_L hacia una fuente estacionaria S. La fuente emite una onda sonora con frecuencia f_s y longitud de onda $\lambda_s = v/f_s$. La figura muestra varias crestas de onda, separadas por distancias iguales λ . Las crestas que se acercan al oyente en movimiento

tienen una rapidez de propagación relativa al oyente de $(v + v_L)$, así que la frecuencia f_L con que llega a la posición de oyente es la siguiente:

$$f_L = \frac{(v + v_L)}{\lambda} = \frac{(v + v_L)}{v/f_s}$$

$$f_L = \left(\frac{v + v_L}{v}\right) f_s = \left(1 + \frac{v_L}{v}\right) f_s \quad (3.1)$$

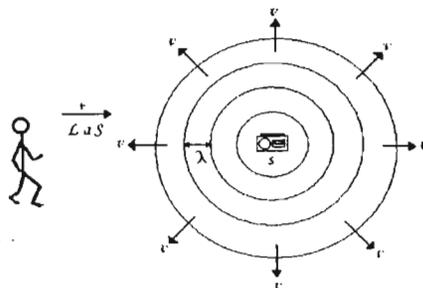


FIGURA 3.4 OYENTE QUE SE ACERCA HACIA LA FUENTE

3.4 POTENCIA.

La definición de trabajo no menciona el paso del tiempo. Si usted levanta una pesa de 400 N una distancia vertical de 0.5 m con velocidad constante, realiza $(400 \text{ N})(0.5 \text{ m}) = 200 \text{ J}$ de trabajo independientemente de que tarde 1 segundo, 1 hora o 1 año. Pero muchas veces necesitamos saber con que rapidez se efectúa el trabajo. Describimos esto en términos de potencia (Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.). En el habla cotidiana, "potencia" suele ser sinónimo de "energía" o "fuerza". En física usamos una definición mucho más precisa: **potencia es la razón temporal a la que se efectúa trabajo, y es una cantidad escalar.** Si se realiza un trabajo ΔW en un intervalo Δt , el trabajo medio efectuado por unidad de tiempo, o potencia media P_{med} se define como:

$$P_{\text{med}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (\text{Potencia media}) \quad \text{---(3.2)}$$

La razón a la que se efectuó trabajo podría no ser constante. Aunque varía, podemos definir la potencia instantánea P como el límite del cociente de la Ec. (3.2) cuando Δt se aproxima a cero:

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (\text{potencia instantánea}) \quad \text{---(3.3)}$$

La unidad de potencia en el SI es el watt (W), llamada así por el inventor inglés James Watt. Un watt es un joule por segundo ($1 \text{ watt} = 1 \text{ J/s}$). El kilowatt ($1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$) y el megawatt ($1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$) son de uso común. En el sistema inglés el trabajo se expresa en pie-libra, y la unidad de potencia es el pie-libra por segundo. También se usa una unidad mayor, llamada el caballo de fuerza (hp):

$$1 \text{ hp} = 550 \text{ ft}\cdot\text{lb/s} = 33,000 \text{ ft}\cdot\text{lb/min.}$$

O sea que un motor de 1 hp trabajando a plena carga realiza 33000 ft·lb de trabajo cada minuto. Un factor de conversión útil es:

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W} = 0.746 \text{ kW},$$

es decir, un caballo de fuerza equivale a cerca de 3/4 de Kilowatt.

El Watt es una unidad común de potencia eléctrica: una bombilla de 100 Watt convierte 100 J de energía eléctrica en luz y calor cada segundo, pero los watts no son inherentemente eléctricos. Una bombilla podría calificarse en caballos de fuerza, y algunos fabricantes de autos califican sus motores en kilowatts, no hp.

Las unidades de potencia pueden servir para definir nuevas unidades de trabajo o energía. El kilowatt-hora (kWh) es la unidad usual de la energía eléctrica. Un kWh es el trabajo realizado en una hora (3600 s) cuando la potencia es 1kW (10^3 J/s), así que:

$$1\text{kWh} = (10^3 \text{ J/s})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}.$$

El kilowatt-hora es una unidad de trabajo o energía, no de potencia.

En mecánica también podemos expresar la potencia en términos de la fuerza y velocidad. Suponga que una fuerza \vec{F} actúa sobre un cuerpo mientras realiza un desplazamiento $\vec{\Delta s}$. Si F_{\parallel} es la componente de \vec{F} tangente a la trayectoria (paralela a $\vec{\Delta s}$), el trabajo realizado por la fuerza es $\Delta W = F_{\parallel} \Delta s$, y la potencia media es:

$$P_{\text{med}} = \frac{F_{\parallel} \Delta s}{\Delta t} = F_{\parallel} \frac{\Delta s}{\Delta t} = F_{\parallel} v_{\text{av.}} \quad \text{---(3.4)}$$

La potencia instantánea P es el limite de este cuando $\Delta t \rightarrow 0$.

$$P = F_{\parallel} v \quad \text{---(3.5)}$$

Donde v es la magnitud de la velocidad instantánea. También podemos expresar la Ec.(3.5) en términos del producto escalar.

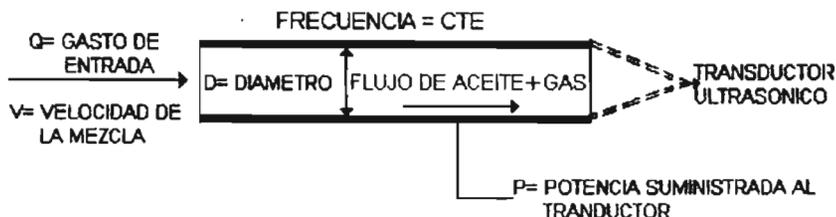
La razón instantánea a la que la fuerza realiza trabajo sobre una partícula es:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} \text{ ----- (3.6)}$$

3.5 ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA OBTENER UNA EXPRESIÓN (ECUACIÓN) EN FUNCION DE LA POTENCIA REQUERIDA POR EL TRANSDUCTOR ULTRASONICO PARA LA LIBERACIÓN DE GAS DE UNA MEZCLA DE CRUDO.

Debe haber varias formas de identificar un mismo problema para futuros estudios, ya con planteamientos más caracterizados, sirviendo los ya existentes como base para realizar un nuevo modelo para este caso, o mejorar y ampliar el que ya esta hecho.

Para este estudio, se realiza un análisis dimensional con el teorema de π Buckingham y así podemos generar curvas que nos mostrarán el comportamiento que queremos identificar, y así confirmar nuestro estudio, o para empezar un nuevo, por lo tanto, en este caso nos servirá este análisis para confirmar y aproximar más el comportamiento de este fenómeno.



PROPIEDADES DE LA MEZCLA
DE HIDROCARBUROS



μ = VISCOSIDAD
 ρ = DENSIDAD

FIGURA 3.5.VARIABLES DEL SISTEMA

TABLA 3.1 SIMBOLOS Y DIMENSIONES DEL SISTEMA

VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL SISTEMA	SÍMBOLO	DIMENSIÓN
velocidad de la mezcla de hidrocarburos	V	$M^0 L^1 T^{-1}$
viscosidad de la mezcla de hidrocarburos	μ	$M^1 L^{-1} T^{-1}$
densidad de la mezcla de hidrocarburos	ρ	$M^1 L^{-3} T^0$
diámetro interior del transductor	D	$M^0 L^1 T^0$
poder acústico / volumen generado o absorbido en el fluido	W	$M^1 L^{-1} T^{-3}$

Ordenando las variables que intervienen en el sistema:

	W	ρ	V	D	μ
M	1	1	0	0	1
L	-1	-3	1	1	-1
T	-3	0	-1	0	-1

Nota: el rango de la matriz adimensional es $r = 3$, el orden del determinante diferente de cero indica el rango de la matriz.

De acuerdo al teorema π de Buckingham:

$$i = n - r = 5 - 3 = 2$$

Lo anterior indica, que tendrá dos grupos adimensionales o términos independientes.

El núcleo de variables será:

$$D, V, \rho$$

Expresando productos adimensionales π_1 y π_2 tenemos:

$$\pi_1 = D^a_1 V^b_1 \rho^c_1 W$$

$$\pi_2 = D^a_1 V^b_1 \rho^c_1 \mu$$

Para π_1 :

$$[M^0 L^0 T^0] = [L]^a_1 [L T^{-1}]^b_1 [M L^{-3}]^c_1 [M L^{-1} T^{-3}]$$

$$M^0 L^0 T^0 = M^{c+1}_1 L^{a+b-3c-1}_1 T^{-(b+3)_1}$$

Evaluando cada uno de los elementos se tiene:

Para:

M:	$0 = c_1 + 1$
L:	$0 = a_1 + b_1 - 3c_1 - 1$
T:	$0 = -b_1 - 3$

Resolviendo el sistema de ecuaciones tenemos:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 \\ b_1 &= -3 \\ c_1 &= -1 \end{aligned}$$

Para π_2 :

$$[M^0 L^0 T^0] = [L]^a_2 [L T^{-1}]^b_2 [M L^{-3}]^c_2 [M L^{-1} T^{-1}]$$

$$[M^0 L^0 T^0] = M^{c+1}_2 L^{a+b-3c-1}_2 T^{-(b+1)_2}$$

Para :

$$M: 0 = c_2 + 1$$

$$L : 0 = a_2 + b_2 - 3c_2 - 1$$

$$T : 0 = -b_1 - 1$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones tenemos que:

$$a_1 = -1$$

$$b_1 = -1$$

$$c_1 = -1$$

Sustituyendo cada uno de los exponentes en términos de π_1 y π_2 tenemos:

Para π_1 :

$$\pi_1 = D V^{-3} \rho^{-1} W$$

$$\pi_1 = \frac{DW}{V^3 \rho^1} \text{ ----- (3.7)}$$

Para π_2 :

$$\pi_2 = D^{-1} V^{-1} \rho^{-1} \mu$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{DV\rho} = \frac{1}{N_R} \text{ ----- (3.8)}$$

Donde N_R es el numero de Reynolds.

Expresando el grupo de la ecuación 3.8 en función de la ecuación 3.7 se obtiene:

$$\pi_1 = F(\pi_2)$$

$$\frac{DW}{V^3 \rho} = \frac{1}{N_R} = C_L \text{ ----- (3.9)}$$

A C_L le denominaremos coeficiente de liberación de gas. Despejando la potencia de la ecuación 3.9, finalmente nos queda:

$$W = C_L \rho V^3 D^{-1} \text{ ----- (3.10)}$$

Esta ecuación representa la potencia requerida por el transductor para liberar gas de una mezcla de hidrocarburos fluyendo a través de un ducto.

Aplicando logaritmos a la ecuación 3.10 se obtiene:

$$\ln W = \ln C_L + \ln [\rho V^3 D^{-1}] \text{ ----- (3.11)}$$

Con esta ecuación se obtendrán curvas características que representen el comportamiento de una mezcla de hidrocarburos al ser estimulada con un transductor ultrasónico.

Ahora se muestra en la Figura 3.6 el resultado de hacer una corrida con datos obtenidos experimentalmente y que fueron introducidos en la ecuación 3.11, como era de esperarse se obtuvo una curva que representa de forma macroscópica el comportamiento del crudo al ser irradiado con ondas ultrasónicas.

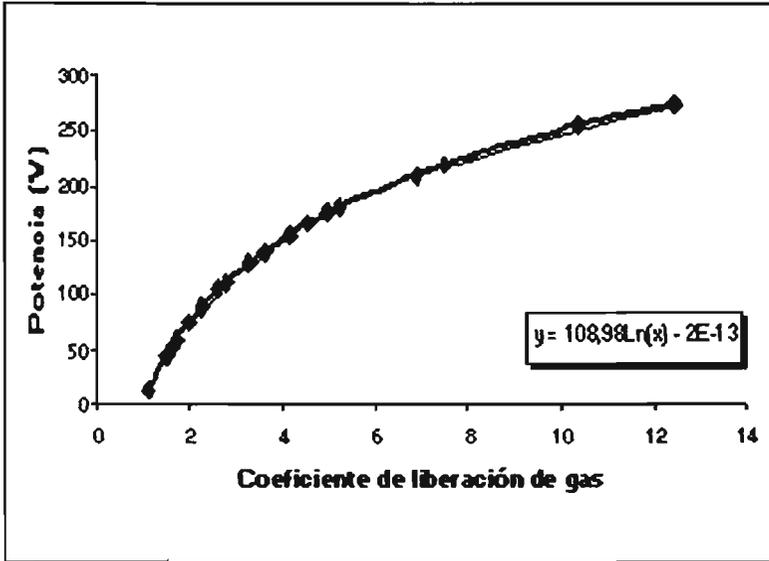


FIGURA 3.6 POTENCIA VS LIBERACION DE GAS

Una vez que se ha obtenido este gráfico es posible calcular o estimar la potencia y la liberación de gas que habrá, para este caso de un rango de 0 a 300watts de potencia en función del coeficiente de liberación de gas, si es que se quiere realizar esta estimación directamente en el gráfico, pero también se tiene la opción de utilizar la ecuación de comportamiento tendencial y hacerlo para la potencia que se requiera.

CAPITULO IV

**DISEÑO DE LAS PRUEBAS DE
LABORATORIO DEL SISTEMA
ULTRASÓNICO**

CAPITULO IV

El objetivo de las pruebas realizadas propone evaluar la liberación de los componentes ligeros en forma gaseosa debido a irradiación con ondas ultrasónicas que permiten la estabilización de petróleo crudo, también observar como es que este tipo de irradiación modifica el estado físico del petróleo crudo y evaluar los cambios de temperatura, de presión y cuantificará el volumen de gas liberado. Con objeto de obtener una mejor caracterización de las muestras se realizaron treinta repeticiones para cada tipo diferente. A continuación tenemos por separado las actividades que se realizan en cada una de las pruebas.

4.1 TRASPASO DE LA MUESTRA.

Es de suma importancia que el petróleo crudo sometido a energía ultrasónica, presente las características y condiciones de campo, esto permite evaluar fehacientemente los resultados. El petróleo deberá de estar libre de contaminantes, siendo nuestro principal contaminante el aire del medio ambiente. Tomando en cuenta lo anterior, se diseñó una metodología adecuada para llevar a cabo el traspaso de la muestra a nuestro banco de pruebas. La metodología es la siguiente:

- a) Ensamblar la celda ultrasónica y sus accesorios como lo muestra a detalle la Figura 4.1
- b) Conectar eléctricamente el transmisor electrónico de presión a la computadora y verificar su funcionamiento.
- c) Conectar eléctricamente el transmisor electrónico de temperatura a la computadora y verificar su funcionamiento.
- d) Llenar a su totalidad la celda de alta presión con agua. Utilizar la válvula V8 y V9 de entrada de la muestra para introducir el agua, como lo muestra la Figura 4.1, del banco de pruebas.
- e) Purgar las líneas y cámara del transmisor electrónico de presión. Verificar su funcionamiento.

- f) Realizar las conexiones del cilindro del nitrógeno, cilindro muestreador y celda ultrasónica, como muestra la figura del banco de pruebas. Efectuar estas conexiones con tubing de 6.5 mm (1/4 in), atornillar las tuercas de tal forma que no sellen para poder purgar.
- g) Abrir la válvula V1 a su totalidad del cilindro de nitrógeno.
- h) Regular la presión de salida del nitrógeno, a una presión igual a la de la muestra obtenida en el campo con la ayuda de R1.
- i) Dejar fluir un poco de nitrógeno por las uniones de tubing de la línea R1 hasta V3 y apretar hasta evitar fuga. Con esto aseguramos que en esta línea no exista aire.
- j) Abrir válvula V3 del cilindro muestreador.
- k) Abrir la válvula V4 del cilindro muestreador y repetir el paso i), ahora con petróleo en lugar de nitrógeno para este tramo de conexión.
- l) Abrir la válvula V6 de la entrada de la muestra. Si los pasos anteriores fueron ejecutados correctamente el sistema estará perfectamente empacado, notándose si la presión no tiene variación en el registro de la Pc.
- m) Abrir lo mínimo posible, la válvula V7 para purgar la celda, únicamente de tal forma que deje gotear el agua.
- n) Cerrar la válvula V7 de purga de la celda en el instante que se manifieste salida del petróleo.
- o) Purgar la línea de la celda a la válvula V5 en el punto cercano a dicha válvula por la unión de tubing, apretar la unión al término de esta operación.

Cerrar la válvula V4 de entrada de la muestra.

En este momento se tiene en el interior de la celda una muestra con características iguales bajo las cuales fueron tomadas en campo y se inicia la experimentación.

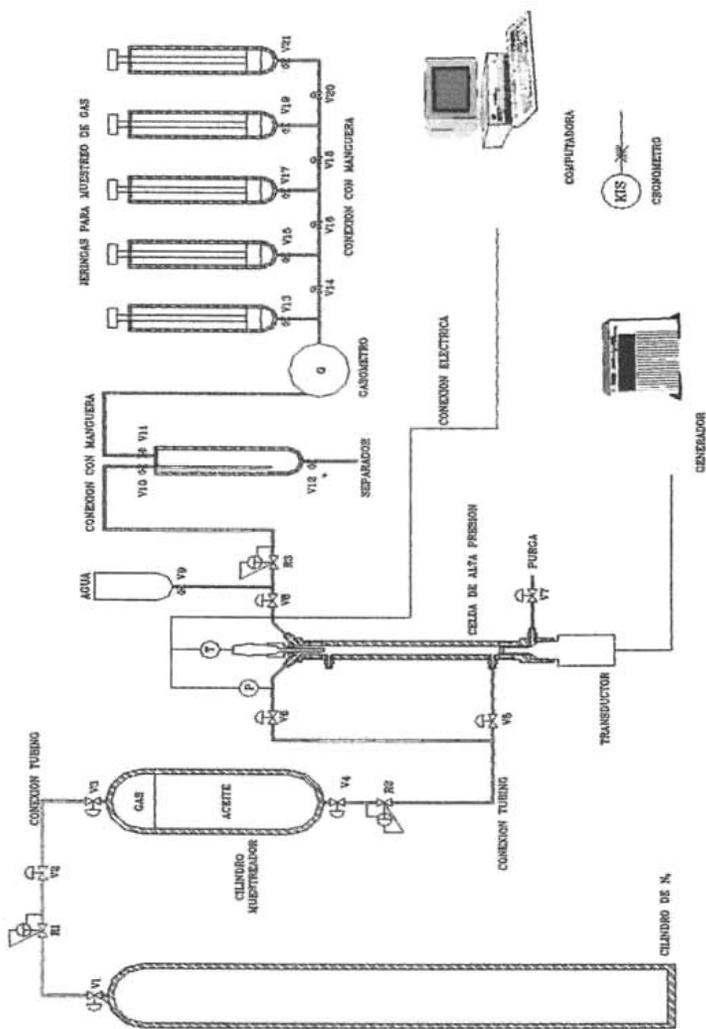


FIGURA 4.1 DIAGRAMA GENERAL DEL BANCO DE PRUEBAS.

4.2 DESARROLLO Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

4.2.1 Efectos del ultrasonido sobre una columna de líquido.

Para iniciar con la experimentación y marcar el inicio de las pruebas estáticas, se colocó en el interior de la celda ultrasónica una muestra de líquido con cierta cantidad de gas disuelto, en este caso agua mineral, se midió la presión hidrostática de esta columna antes y durante la excitación ultrasónica, posteriormente se realiza otro experimento cambiando el líquido por otro que no tuviese gas disuelto como el agua natural y los resultados fueron los siguientes.

TABLA 4.1 RESULTADOS DE LA PRUEBA SOBRE UNA COLUMNA DE LÍQUIDO

No PRUEBA	TIPO DE LÍQUIDO	PRESIÓN HIDROSTÁTICA SIN ULTRASONIDO		POTENCIA DE EXCITACIÓN Watts	PRESIÓN HIDROSTÁTICA CON ULTRASONIDO		CAMBIO EN EL NIVEL DE LA COLUMNA
		Kpa	(psi)		Kpa	(psi)	
1	Agua Mineral	5.929	(0.86)	50	5.722	(0.83)	Se Incrementó
2	Agua Natural	5.998	(0.87)	50	5.929	(0.86)	No se Observaron cambios

A partir de estos resultados, se puede observar que la liberación de gas contenido en el agua mineral permite por una parte disminuir la presión en el fondo y por otra parte la elevación de la columna de líquido.

4.2.2 Liberación de gas por incremento de temperatura.

En la bibliografía revisada se encontró, que el ultrasonido por efecto de la vibración que produce incrementa la temperatura del medio que irradia, esto es, cierta porción de la energía ultrasónica aplicada sobre un medio, se

transforma en energía calorífica, misma que se transfiere sobre el fluido que se estimula. En el caso particular de la excitación del crudo tomado de un yacimiento, se generara además de la liberación de gas disuelto un considerable incremento de temperatura en la muestra de estudio. El incremento de temperatura del crudo es uno de los métodos usados para desgasificarlo. Con el propósito de evaluar y cuantificar la cantidad de gas liberado por el efecto de la temperatura se realizaron pruebas y así poder comparar la cuantificación del gas liberado por otros métodos, que para llevar acabo este experimento, usamos el sistema como el que se muestra en la Figura 4.1.

Se llenó la celda ultrasónica con un crudo estabilizado, posteriormente se inicia el calentamiento de la misma con ayuda de una cinta térmica, en el momento en que el transmisor de temperatura instalado en la celda indico una lectura, se determinó al primer evento, en este instante se toma la presión alcanzada en el interior de la celda y se abre la válvula V8 para poder cuantificar el gas liberado. Lo anteriormente descrito se realizó con diez muestras a diferentes temperaturas, denominando a cada muestra como evento. Para cada intervalo de temperatura se efectuó con diferentes muestras pero tomadas del mismo lote, los resultados de los eventos más representativos se muestran en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2 RESULTADOS DE LIBERACIÓN DE GAS POR INCREMENTO DE TEMPERATURA

Muestra	Temperatura inicial °C	Temperatura final °C	Tiempo minutos	Presión Kpa (psi)	Volumen de gas (ml)
1	23.0	37.5	15	20.684 (3.0)	1.5
2	32.2	50	15	31.026 (4.5)	3.0
3	29.5	60	10	44.815 (6.5)	5.0
4	36.9	70	10	55.158 (8.0)	7.5

En la celda el volumen residual de crudo en promedio es de 105 cm³ (105 ml), esto es, sólo 30 cm³ (30 ml) menos del volumen total de la celda.

Como podemos notar, en la Tabla 4.2 la temperatura ayuda a desgasificar, a mayor temperatura dentro de la celda ultrasónica, mayor es el gas que se logra separar.

Inicialmente se pensó aplicar el ultrasonido a la muestra de petróleo crudo hasta alcanzar la temperatura como en las pruebas anteriores, sin embargo, debido a las características del ultrasonido, mientras en la parte superior de la celda se registro una temperatura de 44 °C, en la parte inferior se tenía una lectura de 55 °C. Debido a este comportamiento se optó por realizar el experimento una sólo vez, obteniendo los siguientes resultados:

- Temperatura inicial = 31.4 °C.
- Temperatura en la parte superior = 44 °C.
- Temperatura en la parte inferior = 55 °C.
- Presión alcanzada = 62.05 MPa (9 lb/in²).
- Tiempo de excitación = 15 min.
- Potencia aplicada = 35 W.
- Volumen de gas liberado = 15 cm³ (15 ml).

Comparando este único resultado con los obtenidos en la liberación por temperatura, se puede apreciar que el volumen de gas liberado de una sola muestra excitada con ultrasonido, casi iguala el volumen liberado en cuatro muestras excitadas con temperatura. Por lo que podemos concluir que, aún cuando la energía ultrasónica produce un incremento de temperatura de la muestra, la mayor cantidad de gas liberado se debe principalmente a la energía ultrasónica, la energía calorífica también es un factor que ayuda a la liberación del gas.

4.2.3 Liberación de gas por disminución de la presión.

Cuando la muestra se encontró dentro de la celda ultrasónica, y empleando el procedimiento que se menciona en la sección 4.1 denominada traspaso de la muestra, comenzó la prueba registrándose los primeros resultados.

Condiciones de la muestra:

- Cantidad de muestra: 135 cm³ (135 ml).
- Temperatura inicial: 41.5 °C.
- Presión inicial: 810.82 MPa (117.6 lb/in²).

Se abrió paulatinamente la presión hasta alcanzar la presión atmosférica en el interior de la celda: los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.3.

**TABLA 4.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA POR
DECREMENTO DE PRESIÓN**

Tiempo min	Vol. de Gas Liberado (m ³)	(ml)	Temperatura °C
0.0	0	0	35
0.3	1.37x10 ⁻³	1370	35
60.0	1.25x10 ⁻³	1250	30
810.0	8.75x10 ⁻⁴	875	18

En la celda el volumen residual de petróleo en promedio es de 98 cm³ (98 ml) sólo el 27 % del volumen total de la celda sale de ella.

Durante la realización de esta prueba, el abatimiento de presión que tenía la muestra en el momento de ser obtenida hasta la presión atmosférica se realizó muy rápido, de manera que se decidió dejar las muestras con la presión abatida los minutos que se registraron en los resultados. Tabla 4.3.

Con base en los resultados anteriores, se concluyo que: se tiene una liberación de gas de 1370 cm³ (1370 ml) en el momento del abatimiento de presión, siendo esto en el primer evento, y en el ultimo evento se registró un volumen de gas liberado de 875 cm³ (875 ml), el detalle de lo anterior estriba en la importancia que juega la temperatura en este experimento tan tardado debido a las características que se modifican en diferentes medios ocasionados por la variación de la temperatura, como se puede ver al iniciar las pruebas la temperatura fue de 41.5 °C y al finalizar éstas de 18.0 °C con una disminución considerable del volumen de gas liberado, por lo tanto, la temperatura ambiental es un factor determinante en este tipo de experimentos ya que modifica la temperatura de la muestra, de la trampa de separación y también del gasómetro.

4.2.4 Liberación de gas por estimulación ultrasónica.

Una vez llena la celda ultrasónica con muestra de petróleo crudo se inicia la prueba excitando ultrasónicamente a la muestra durante toda la prueba.

Se realizaron dos series de pruebas de diez eventos cada serie, las cuales se denominaron experimento 1 y experimento 2, diferentes sólo en la temperatura de inicio, en el experimento 1 fue de 30.3 °C y en el experimento 2 fue de 52°C.

Condiciones de la muestra:

- Cantidad de muestra: 135 cm³ (135 ml)
- Temperatura inicial: 24.5 °C
- Presión inicial: 579.15 MPa (84 lb/in²)

Los resultados obtenidos durante la prueba son:

Experimento 1.

TABLA 4.4 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 1 CON ESTIMULACIÓN ULTRASÓNICA

TIEMPO	VOL.GAS.LIB.		TEMPERATURA °C	PRESIÓN MPa (psi)	POTENCIA watts
	cm ³	ml			
11:43	0	(0)	30.3	1.034 (150)	70
11:45	0	(0)	33.0	1.172 (170)	75
11:46	0	(0)	34.0	1.241 (180)	80
12:00	250	(250)	31.8	0.551 (80)	50
12:07	1370	(1370)	44.9	0.101 (14.7)	40
12:16	1640	(1640)	55.0	0.101 (14.7)	40
12:16	1735	(1735)	60.0	0.101 (14.7)	40

Experimento 2.

TABLA 4.5 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 2 CON ESTIMULACIÓN ULTRASÓNICA

TIEMPO	VOL. GAS LIB.		TEMPERATURA °C	PRESIÓN		POTENCIA Watts
	CM ³	(ML)		MPa	(psi)	
13:02	0	(0)	52	1.034	(150)	70
13:04	0	(0)	55.8	1.241	(180)	80
13:05	130	(130)	55.3	0.551	(80)	100
13:08	500	(500)	74	0.344	(50)	100
13:10	750	(750)	70	0.068	(10)	80
13:12	1050	(1050)	76	0.101	(14.7)	100
13:18	1720	(1720)	76	0.101	(14.7)	90
13:20	1735	(1735)	82	0.101	(14.7)	80

En la celda el volumen residual de petróleo crudo en promedio fue de 49 cm³ (49 ml), esto es, el 70 % del volumen inicialmente cargado.

Como se puede observar en los datos que se registraron durante la realización de las pruebas anteriores, la temperatura vuelve a ser un factor importante, dado que en la prueba donde la temperatura es mayor, la potencia requerida disminuye paulatinamente, esto mostró un beneficio ya que no existirá un requerimiento alto de potencia, esto es, debido a que las propiedades reológicas del crudo cambian, el consumo de energía del equipo en operación disminuye, todo esto coincide con lo encontrado en el análisis dimensional que se realiza en esta tesis, y se comprobó con estos experimentos que la temperatura ayuda a liberar el gas disuelto en el crudo. Se requiere encontrar

la potencia mínima necesaria para excitar el crudo y así liberar el gas disuelto, que es uno de los objetivos primordiales que se sigue en este modelo presentado en el inciso 3.5 del capítulo III y que servirá como punto de comparación el dato obtenido en los experimentos, con el teórico de la ecuación que representa este fenómeno.

4.2.5 Comparación de la cantidad de gas liberado por decaimiento de presión y estimulación ultrasónica.

Las pruebas que se realizaron fueron de forma estática, para estas pruebas se emplearon agua mineral y crudo pesado, las pruebas fueron: liberación de gas por incremento de temperatura, decaimiento de la presión y estimulación ultrasónica; monitoreando para todos los casos las variaciones de presión y temperatura en el interior de la celda ultrasónica.

Los resultados arrojados por estos experimentos proporcionaron la información suficiente para comprobar que el transductor ultrasónico liberó gran cantidad de gas del agua mineral y del petróleo crudo, lo que resultó realmente alentador.

Dado lo anterior, durante la presente sección se presentarán los resultados de las pruebas de liberación de gas ocasionadas por el decaimiento de la presión así como también por la estimulación ultrasónica, para estas pruebas se usó un petróleo crudo con las siguientes características.

- En este caso se muestreó petróleo de 0 % de agua.
- Gravedad API de 33.4 grados.

Se empleó el mismo arreglo de las pruebas anteriores.

Las pruebas consistieron, en hacer circular crudo a presión a través del sistema manteniéndose constantes las condiciones de flujo, presión y temperatura.

Posteriormente, se inició la cuantificación del gas liberado por decaimiento de presión para un volumen constante de crudo, obteniéndose los siguientes resultados: Para un volumen de 100 (ml) desplazados de petróleo se obtuvo un tiempo promedio que de 4 minutos y 11.9 segundos, liberándose un promedio de $1,600 \text{ cm}^3$ (1.6 lt) de gas.

Después de lo anterior, se inició la cuantificación de gas liberado al aplicar ultrasonido con las presiones de entrada y salida de la celda iguales a la de los experimentos anteriores, para un volumen constante de petróleo, obteniéndose los siguientes resultados: Para volumen de 100 (ml) desplazados de petróleo, se obtuvo el tiempo promedio que fue de 1 min. y 23.7 seg, liberándose un promedio de $3,280 \text{ cm}^3$ (3.28 lt) de gas.

Con los resultados obtenidos se puede establecer que:

- El tiempo de desplazamiento de 100 (ml) de petróleo, por decaimiento de presión es 3.01 veces mayor que aplicando ultrasonido.
- El volumen de gas liberado de 100 (ml) de petróleo, por aplicación de ultrasonido es 2.05 veces mayor que por decaimiento de presión.
- La temperatura se incrementó en el interior de la celda de 20° a 50°C en la experimentación con ultrasonido.
- El patrón de flujo a la salida de la celda no fue homogéneo en ambos casos, siendo más notoria la variación cuando se aplico ultrasonido.
- La variación de la densidad de petróleo es realmente mínima.

Se ha verificado cuantitativamente que el sistema de ultrasonido, promueve en forma considerable la liberación de gas disuelto en el crudo. Para validar lo anterior, se trabajó para obtener la mayor cantidad de datos posibles hasta alcanzar un alto grado de repetitibilidad.

Los datos registrados durante las pruebas se pueden observar en la siguientes tablas.

TABLA 4. 6 RESULTADOS DE LA PRUEBA CON ESTIMULACIÓN
ULTRASÓNICA POR 4.11 MINUTOS

No DE PRUEBA	VOL. GAS		VOL.DE CRUDO		TIEMPO NETO
	cm ³	(lt)	cm ³	(lt)	(min)
1	1350	1.35	100	0.1	2:00.0
2	1500	1.5	100	0.1	5:00.0
3	1500	1.5	100	0.1	4:00.0
4	1540	1.54	100	0.1	3:00.0
5	1640	1.64	100	0.1	4:00.0
6	1570	1.57	100	0.1	4:00.0
7	1530	1.53	100	0.1	3:50.0
8	1570	1.57	100	0.1	3:50.0
9	1620	1.62	100	0.1	3:48.0
10	1690	1.69	100	0.1	4:05.0
11	1540	1.54	100	0.1	4:05.0
12	1540	1.54	100	0.1	4:35.0
13	1720	1.72	100	0.1	4:39.0
14	1630	1.63	100	0.1	5:04.0
15	1850	1.85	100	0.1	5:20.0
16	1660	1.66	100	0.1	4:56.0
17	1750	1.75	100	0.1	5:31.0
VOLUMEN LIBERADO DE GAS PROMEDIO	1600	1.6		TIEMPO PROMEDIO	4:11.0

TABLA 4. 7 RESULTADOS DE LA PRUEBA CON ESTIMULACIÓN ULTRASÓNICA POR 1.23 MINUTOS

No. PRUEBA	VOL. GAS		VOL. DE CRUDO		TIEMPO NETO (min.)
	cm ³	(lt)	cm ³	(lt)	
1	2950	2.95	100	0.1	1:00.0
2	2850	2.85	100	0.1	1:07.0
3	3100	3.10	100	0.1	1:05.0
4	3600	3.60	100	0.1	1:03.0
5	3800	3.80	100	0.1	1:14.0
6	3000	3.00	100	0.1	1:14.0
7	3150	3.15	100	0.1	1:24.0
8	3450	3.45	100	0.1	1:18.0
9	4420	4.42	100	0.1	1:51.0
10	2680	2.68	100	0.1	1:54.0
11	3000	3.00	100	0.1	1:48.0
12	3300	3.30	100	0.1	1:46.0
VOLUMEN LIBERADO DE GAS PROMEDIO	3280	3.28	TIEMPO PROMEDIO		1:23.7

4.3 ANÁLISIS QUÍMICO DE COMPUESTOS.

Para continuar con la experimentación, aplicando el equipo ultrasónico instalados en el banco de pruebas y como parte de la evaluación de los efectos que el ultrasonido tiene sobre el petróleo no estabilizado, se realizó una prueba con el siguiente objetivo:

Evaluar los efectos que el ultrasonido tiene sobre una muestra de crudo, mediante el análisis de compuesto realizados a muestras obtenidas a condición de presión y temperatura ambiente, con la liberación de gas aplicando ultrasonido y por decaimiento de presión.

4.3.1 Procedimiento.

- Instalar el banco de pruebas.
- Llenar la celda y empacar el sistema con crudo.

- Circular crudo hasta el separador (más de 300 ml).
- Mantener crudo dentro del separador por un tiempo (5 min.), para liberar gas por decremento de presión.
- Muestrear crudo a la salida del separador, este ha liberado gas por decremento de presión.
- Estimular el crudo con el equipo ultrasónico durante aproximadamente cinco minutos con el sistema cerrado, un instante antes del término de este tiempo abrir la válvula instalada a la salida de la celda para desplazar el crudo contenido en la celda hacia el separador donde se obtuvo la muestra anterior.
- Realizar análisis químicos de compuestos a esta muestra.
- Análisis de resultados.

4.3.2 Características del crudo empleado en la experimentación.

El crudo empleado para prueba, fue obtenido del pozo Samaria-73, en la batería de separación Samaria-II, perteneciente al Distrito Cárdenas.

Su formación productora es un anticlinal que corresponde a los periodos: cretácico superior, medio e inferior, estas formaciones están constituidas principalmente por calizas delimitadas e intensamente fracturadas y, en algunos casos se presentan cavernas de disolución, además las tres formaciones están comunicadas hidráulicamente.

Los límites del yacimiento son: al Norte, la falla inversa que separa al campo Cunduacám-Oxiacaque: hacia el Este, una falla normal que corre en dirección Norte-Sur y; hacia el Sur y Oeste por el contacto agua-crudo.

Para la obtención de esta muestra se tuvo la necesidad de alinear el Samaria-73 hacia el separador de medición. Se determinó por centrifugación la ausencia de agua (0%), así mismo la gravedad API del petróleo crudo fue de 33.4 grados.

4.3.3 Descripción general de la experimentación.

1.- Condiciones de operación.

Se hizo circular petróleo, con un volumen aproximado de 200 cm³ (200 ml) a través del sistema, con una presión estática de 551.58 Kpa (80 lb/in²), la

temperatura ambiente promedio fue de 25 °C, la presión de flujo promedio fue de 351.21 Kpa (55 lb/in²), para ambas pruebas, la temperatura máxima alcanzada dentro de la celda al aplicar ultrasonido fue de 100°C.

2.- Muestreo de crudo que ha liberado gas por decaimiento de presión dentro del separador.

- El sistema fue saturado de petróleo hasta alcanzar la presión estática de 551.58 Kpa (80 lb/in²).
- Se desplazan aproximadamente 200 cm³ (200 ml) de muestra de crudo a las condiciones de flujo siguientes: presión de entrada a la celda = 379.21 Kpa (55 lb/in²), presión de salida = 0 Pa, temperatura 25°C.
- Se obtuvieron 200 cm³ (200 ml) de muestra de crudo a la salida del separador a condiciones de presión y temperatura atmosférica, parte de este volumen se recolectó en recipientes de diferente capacidad, las muestras fueron enviada a los laboratorios: Central 50 cm³ (50 ml), y de Yacimientos 100 cm³ (100 ml), para su análisis químico.

4.3.4 Análisis de resultados proporcionados por el Laboratorio de Yacimientos del Instituto Mexicano del Petróleo.

En las Tablas 4.8 y 4.9 se pueden observar en los resultados de los análisis composicionales efectuado a las muestras de crudo, proporcionados por este laboratorio.

Resulta notable la disminución de los componentes ligeros al aplicar ultrasonido, respecto al análisis composicional cuya liberación de gas se debió al decaimiento de presión, ver Gráficas 4.2 y 4.3.

Por otro lado es importante destacar que la disminución de la presión de vapor fue de 33.09 Kpa (4.8 lb/in²) abs. para un tiempo de excitación ultrasónica de 5 min. y 48.26 Kpa (7 lb/in²) abs. para un tiempo de excitación ultrasónica de 10 min. respecto a la muestra obtenida por decaimiento de presión.

Los resultados obtenidos fueron los esperados, abriendo expectativas importantes. En este momento, es posible asegurar que los efectos que el ultrasonido tiene sobre el petróleo facilitan en gran medida la liberación de gas.

TABLA 4.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL LABORATORIO CENTRAL. (IRRADIACIÓN ULTRASÓNICA POR 5MIN.)

COMPONENTE	MUESTRA INICIAL (DECAIMIENTO DE PRESIÓN)			MUESTRA EXPERIMENTAL (EXITACION X 5 MINUTO)		
	ANÁLISIS 1			ANÁLISIS 2		
	X MOL	PRESIÓN DE VAPOR	(PV)(X MOL)	X MOL	PRESIÓN DE VAPOR	(PV)(X MOL)
C1 METANO	0.00128	5015.00	6.419	0.00108	5015.00	5.416
C2 ETANO	0.01000	795.00	7.950	0.00758	795.00	6.026
C3 PROPANO	0.03426	190.00	6.509	0.02709	190.00	5.147
i-C4 ISO BUTANO	0.01319	51.60	0.681	0.01148	51.60	0.592
C4 n-BUTANO	0.05171	72.20	3.733	0.04637	72.20	3.348
i-C5 ISO PENTANO	0.03745	20.44	0.765	0.03619	20.44	0.740
C5 n PENTANO	0.06001	15.57	0.934	0.05915	15.57	0.921
C6 HEXANO	0.12045	4.50	0.542	0.12308	4.50	0.554
C7+ HEPTANO	0.67165	1.30	0.873	0.68798	1.30	0.894
PRESION DE VAPOR (lb/in ²)	28.41			23.64		

TABLA 4.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL LABORATORIO CENTRAL. (IRRADIACIÓN ULTRASÓNICA POR 10MIN.)

COMPONENTE	MUESTRA INICIAL (DECAIMIENTO DE PRESIÓN)			MUESTRA EXPERIMENTAL (EXITACION X 10 MIN.)		
	ANÁLISIS 1			ANÁLISIS 2		
	X MOL	PRESIÓN DE VAPOR	(PV)(X MOL)	X MOL	PRESIÓN DE VAPOR	(PV)(X MOL)
C1 METANO	0.00128	5015.00	6.419	0.00088	5015.00	4.413
C2 ETANO	0.01000	795.00	7.950	0.00679	795.00	5.398
C3 PROPANO	0.03426	190.00	6.509	0.02541	190.00	4.828
i-C4 ISO BUTANO	0.01319	51.60	0.681	0.01073	51.60	0.554
C4 n-BUTANO	0.05171	72.20	3.733	0.04424	72.20	3.194
i-C5 ISO PENTANO	0.03745	20.44	0.765	0.03482	20.44	0.712
C5 n PENTANO	0.06001	15.57	0.934	0.05716	15.57	0.890
C6 HEXANO	0.12045	4.50	0.542	0.12155	4.50	0.547
C7+ HEPTANO	0.67165	1.30	0.873	0.69840	1.30	0.908
PRESION DE VAPOR (lb/in ²)	28.41			21.44		

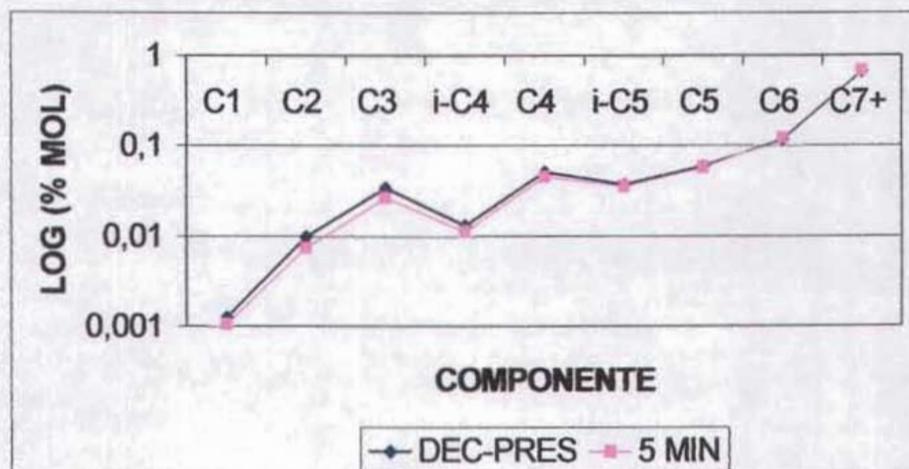


FIGURA 4.2 TENDENCIA DE LA LIBERACIÓN DE LIGEROS POR IRRADIACIÓN ULTRASÓNICA(5 MINUTOS)

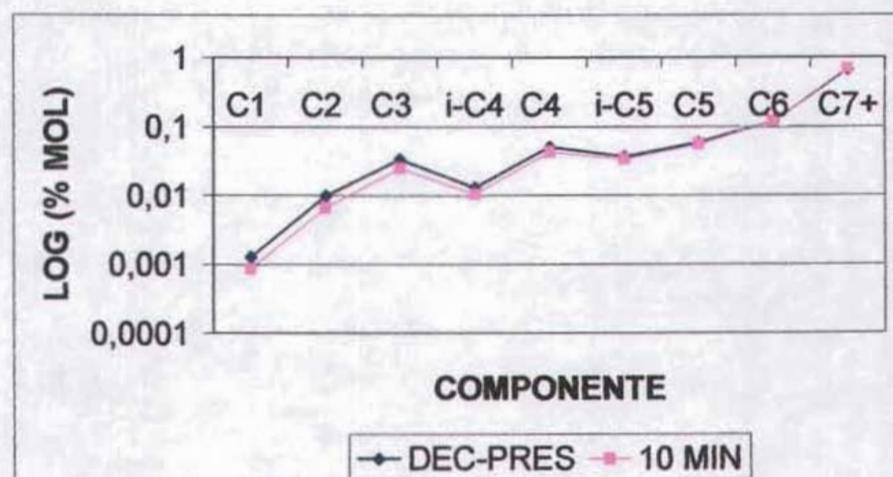


FIGURA 4.3 TENDENCIA DE LA LIBERACIÓN DE LIGEROS POR IRRADIACIÓN ULTRASÓNICA(10 MINUTOS)

TABLA 4.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL LABORATORIO DE YACIMIENTOS.

COMPONENTE	DECAIMIENTO DE PRESION % EN MOL	EXITACIÓN 5 MIN. % EN MOL	EXITACIÓN 10 MIN. % EN MOL
CI	0.128	0.108	0.088
C2	1.000	0.758	0.679
C3	3.426	2.709	2.541
i-C4	1.319	1.148	1.073
n-C4	5.171	4.637	4.424
i-C5	3.745	3.619	3.482
n-C5	6.001	5.915	5.716
C6	12.045	12.308	12.155
C7+	67.165	68.798	69.840
PRESION DE VAPOR (lb/in ²)	28.41	23.64	21.44

4.4 POTENCIA REQUERIDA PARA GENERAR CAVITACIÓN.

Con la finalidad de caracterizar la respuesta del transductor y generador ultrasónico, ante condiciones controladas de temperatura y presión; se realizó una prueba a la cual se le denominó “caracterización del transductor ultrasónico”.

Para tal fin se plantearon dos tipos de pruebas, una con la finalidad de encontrar la cantidad de potencia requerida para que a determinada temperatura y presión se produzca el ruido característico de cavitación, la diferencia entre estas pruebas son las condiciones a las que dichas pruebas se llevaron a cabo con aceite de silicón.

Las pruebas se realizaron de la siguiente manera:

- Se montó el banco de pruebas.
- Colocamos la cinta térmica sobre la celda de pruebas.
- Se llenó la celda con aceite de silicón.

Un evento finalizó cuando se presentó el sonido de cavitación, en cada evento aumento la temperatura, lo anterior es a causa del ultrasonido. Inmediatamente se inició otro evento, hasta terminar la prueba.

4.4.1 Diseño de las pruebas.

PRUEBA 1: A TEMPERATURA Y PRESIÓN AMBIENTE.

A 30 °C y 77.91 Kpa (11.3 lb/in²) como condiciones iniciales, se inicia la prueba e incrementando la presión a 689.47 Kpa (100 lb/in²) en el segundo evento y 1.37 MPa (200 lb/in²) en el tercer evento, continuando con el incremento de presión cada 689.47 Kpa (100 lb/in²) psi por evento hasta llegar a 11.03 MPa (1600 lb/in²), registrando la potencia al finalizar cada evento.

PRUEBA 2: A TEMPERATURA DE 95 °C Y PRESIÓN AMBIENTE.

Se inicia la prueba e igual que en la prueba anterior se incrementa la presión en el segundo evento hasta 689.47 Kpa (100 lb/in²), y para el tercer evento

hasta 1.37 MPa (200 lb/in²) y así aumentando 689.47 Kpa (100 lb/in²) en cada evento siguiente hasta llegar a 11.03 MPa (1600 lb/in²).

4.4.1 Realización de las pruebas.

Antes de realizarse estas pruebas, el grupo de instrumentación de sistemas artificiales de producción del IMP se mostraba un tanto inquieto dado que se pensó que el sistema necesitaba demasiada potencia para producir la cavitación dentro de un pozo dadas las condiciones de éste, pero al observar los resultados en estas pruebas sobre aceite de silicón se tiene una nueva perspectiva.

En la prueba 1 a ciertas condiciones de temperatura (que estuvo oscilando entre 32° y 39.8°C durante toda la prueba) se obtuvieron datos en los cuales se muestra un claro aumento de potencia para producir el ruido de cavitación al ir incrementando la presión. La presión máxima requerida para la cavitación se presenta a 11.03 MPa (1600 lb/in²) de presión y fue con un valor de 370 w lo cual hasta este momento era preocupante ya que se pensó que a mayor temperatura y presión se necesitaría mayor potencia.

Al llevarse a cabo la prueba 2, se aumento la temperatura a 95°C con ayuda de la cinta térmica y con presión atmosférica se iniciaron los eventos, al llegar a la presión de 7.58 MPa (1100 lb/in²) y una temperatura de 103.8°C se obtuvo un requerimiento de potencia de 275 w y en la prueba 1 a la misma presión pero con una temperatura de 34.5°C tenía un requerimiento de

potencia de 175 w, al seguir con la prueba 2 (donde el siguiente evento era con una presión de potencia de 8.27 MPa (1200 lb/in²) y una temperatura de 105.4°C) disminuyó la cantidad de potencia necesaria para producir el ruido de cavitación el cual fue de 210 w, en el último evento de la prueba en el cual la presión fue de 11.03 MPa (1600 lb/in²) aún a temperatura de 108.6°C la potencia necesaria era de 89 w, por lo que se decidió seguir aumentando la presión de la misma manera que lo veníamos haciendo hasta llegar a una presión de 13.78 MPa (2 lb/in²) y a la temperatura que se incrementará debido a la irradiación con ultrasonido (siendo este de 108.5°C) obteniendo una respuesta de potencia requerida de 45 w.

Los datos obtenidos en las pruebas para la caracterización del transductor ultrasónico, tanto de prueba 1 como de la prueba 2, se presentan a continuación:

TABLA 4.11 DATOS OBTENIDOS DURANTE DE LA PRUEBA 1

Temp. °C	Presión MPa (psi)	Potencia W	Frecuencia KHz	Voltaje Kv	Corriente A	Comentarios
32.0	0.077 (11.3)	3.0	20.0	0.4	0.6	
32.0	0.689 (100)	15.0	20.0	0.5	0.7	
32.0	1.378 (200)	38.0	20.0	0.8	0.7	
32.0	2.068 (300)	62.0	20.0	0.9	0.8	
32.5	2.757 (400)	84.0	20.0	1.0	0.9	
32.7	3.447 (500)	90.0	20.0	1.2	0.9	
33.3	4.136 (600)	100.0	20.0	1.2	0.8	
33.3	4.826 (700)	115.0	20.0	1.2	0.9	
34.7	5.515 (800)	140.0	20.0	1.4	1.0	
37.0	6.205 (900)	160.0	20.0	1.6	0.9	SUBIO A 100 psi
35.5	6.894 (1000)	185.0	20.0	1.6	1.0	
34.5	7.584 (1100)	175.0	20.0	1.6	1.1	1150 psi a 36.3 °C
35.5	8.273 (1200)	200.0	20.0	1.2	1.1	1300 psi a 37.8 °C
36.5	8.963 (1300)	225.0	20.0	1.2	1.1	1400 psi a 38.6 °C
38.4	9.652 (1400)	275.0	20.0	2.0	1.3	39.7 °C
39.0	10.342 (1500)	320.0	20.0	2.4	1.3	1600 psi a 40.8 °C
39.8	11.031 (1600)	370.0	20.0	2.9	1.3	

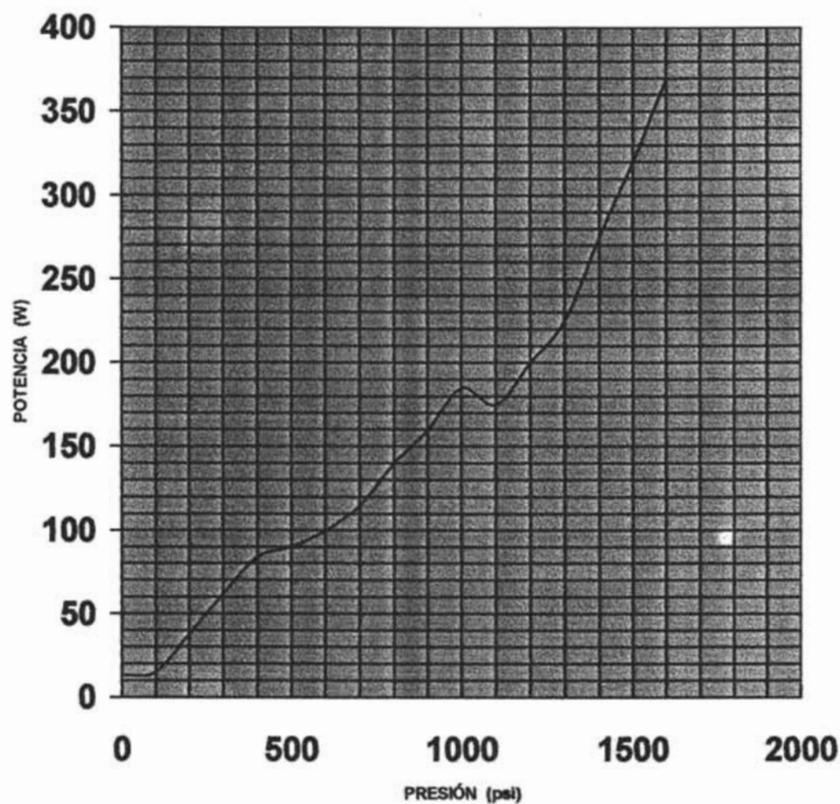


FIGURA 4.4 PRESIÓN VS POTENCIA RESULTANTE DE LA PRUEBA 1

TABLA 4.12 DATOS OBTENIDOS DURANTE LA PRUEBA 2

Temp. °C	Presión MPa (psi)	Potencia W	Frecuencia KHz	Voltaje Kv	Corriente A	Comentarios
95.2	0.077 (11.3)	14.0	20.0	0.6	0.6	
95.7	0.689 (100)	45.0	20.0	1.1	0.5	
96.1	1.378 (200)	55.0	20.0	1.3	0.7	
96.6	2.068 (300)	112.0	20.0	1.7	1.4	
97.4	2.757 (400)	130.0	20.0	1.8	0.8	97.9 °C
97.6	3.447 (500)	140.0	20.0	1.8	0.9	98.2 °C
98.8	4.136 (600)	165.0	20.0	1.9	0.9	99.2 °C
99.5	4.826 (700)	155.0	20.0	2.2	0.8	100.0 °C
100.5	5.515 (800)	180.0	20.0	2.4	0.9	100.6 °C
100.6	6.205 (900)	220.0	20.0	2.6	1.0	101.3°C a1000 psi
102.3	6.894 (1000)	255.0	20.0	2.8	1.1	103.1°C
103.8	7.584 (1100)	275.0	20.0	2.5	1.2	104.4 °C
105.4	8.273 (1200)	210.0	20.0	2.4	1.0	106.4 °C
107.2	8.963 (1300)	175.0	20.0	2.0	1.0	107.4 °C
107.8	9.652 (1400)	105.0	20.0	2.0	0.7	108.3 °C
108.5	10.342 (1500)	90.0	20.0	1.7	0.6	109.0 °C
108.6	11.031 (1600)	89.0	20.0	1.5	0.6	108.6 °C
108.7	11.721 (1700)	75.0	20.0	1.3	0.7	109.0°C
109.0	12.410 (1800)	58.0	20.0	1.1	0.5	109.0 °C
109.0	13.100 (1900)	60.0	20.0	1.1	0.7	108.9 °C
108.5	13.789 (2000)	45.0	20.0	1.1	0.4	108.7 °C

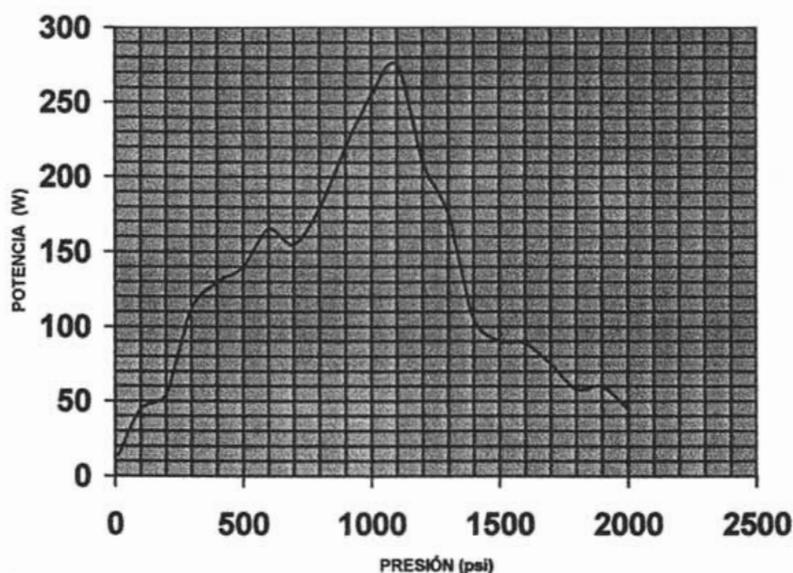


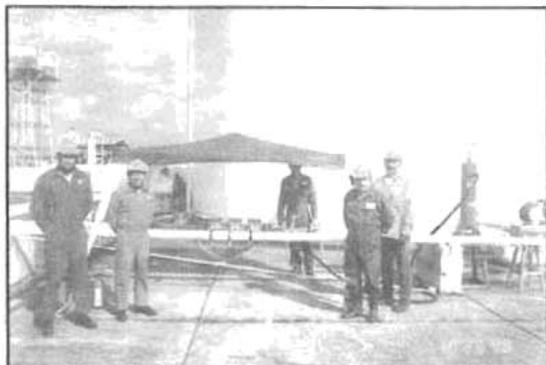
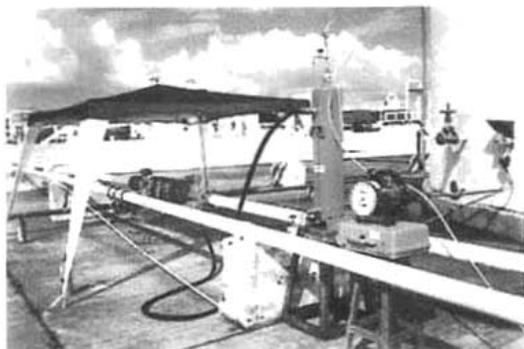
FIGURA 4.5 PRESIÓN VS POTENCIA RESULTANTE DE LA PRUEBA 2

Haciendo un análisis de los datos obtenidos en estas pruebas, se puede decir que el equipo no presenta limitantes en cuanto a potencia requerida dentro del pozo donde se presentan temperaturas de hasta 150 °C y presiones del orden de 28.95 MPa (4200 lb/in²).

CAPITULO V

DISEÑO DE PRUEBAS EN UNA BATERÍA DE SEPARACIÓN PARA EL SISTEMA ULTRASÓNICO

CAPITULO V



5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ULTRASÓNICO PARA ESTABILIZACIÓN DE CRUDO.

5.1.1 Introducción

Una vez realizadas las pruebas ultrasónicas de laboratorio, se procedió a realizar las pruebas con el sistema ultrasónico en la batería de separación Bellota, a través de un proyecto dirigido por Instituto Mexicano del Petróleo. En este capítulo se detalla el equipo ultrasónico.

El equipo promueve la liberación de los componentes ligeros e intermedios de una mezcla de hidrocarburos, buscando con ello, que la fase líquida residual tenga una Presión de Vapor Reid óptima para considerarlo como un aceite estabilizado.

A continuación, se muestra un diagrama del equipo completo que integra el sistema ultrasónico para la estabilización del aceite.

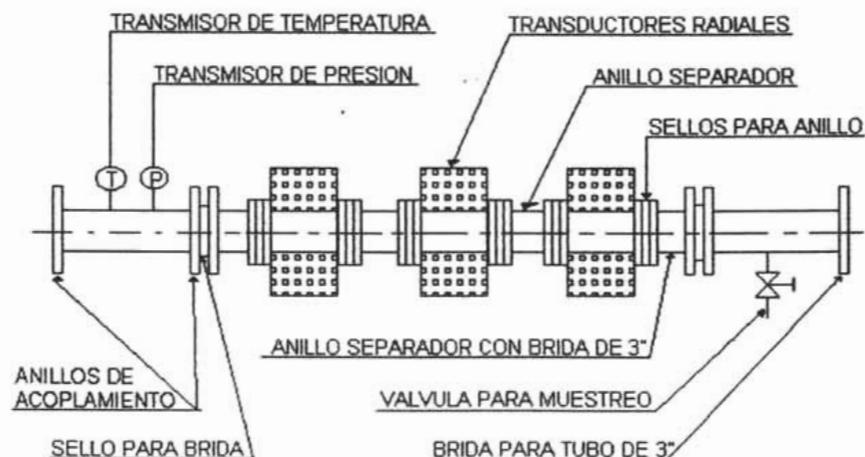


FIGURA 5.1 DIAGRAMA DEL EQUIPO ULTRASÓNICO

5.1.2 Transductores ultrasónicos. Son los elementos que transforman la energía eléctrica en ondas de energía ultrasónica, capaces de producir cavitación y liberación de gas disuelto o atrapado en el líquido sobre el que actúan. Sus características principales son:

- Diámetro interior: 3 in
- Presión máxima de operación: 500 lb/in²
- Temperatura máxima de operación: 100 °C
- Frecuencia de operación: 20 Khz
- Tipo: Magnetoestrictivo
- Forma: Radial

5.1.3 Generadores Ultrasónicos. Son los encargados en suministrar la energía eléctrica y frecuencia requerida por los transductores. Sus características principales son:

- Alimentación eléctrica: 117 Volts, 20 ampers
- Temperatura máxima de operación: 60 °C
- Frecuencia generada: 20 Khz
- Dimensiones físicas: 40 X 20 X 45 cm
- Peso: 22 Kg

5.1.4 Transmisores de Temperatura. Instrumento electrónico para registrar las variaciones de temperatura con la capacidad de monitorearlo a través de una computadora. Sus características principales son:

- Rango de temperatura: 0 – 150 °C
- Tipo de salida: 4 – 20 mA
- Alimentación eléctrica: 10 – 36 VDC
- Con sensor tipo: RTD

5.1.5 Transmisores de Presión. Instrumento electrónico para registrar las variaciones de presión con la capacidad de monitorearlo a través de una computadora. Sus características principales son:

- Rango de presión: 0 – 800 PSI
- Tipo de salida: 4 – 20 mA
- Alimentación eléctrica: 10 – 36 VDC

5.1.6 Sistema de Adquisición de Datos. Está conformado básicamente por módulos de comunicación, que actúan como interfase entre los transmisores y una computadora, en la cual está instalado un programa de monitoreo y graficación del comportamiento de la presión y la temperatura. Sus características principales son:

- Computadora Industrial Pentium MMX 200MHZ
- Programa Genie para adquisición de datos
- Módulo ADAM para interfase RS232 a RS485
- Módulo ADAM para 8 entradas analógicas
- Fuente de alimentación de 115 Volts 5 Ampers a 25 VDC

5.1.7 Anillos separadores. Estos elementos dan estructura a la sección de emisión ultrasónica. Sus características principales son:

- Diámetro interior: 3 in
- Presión máxima de operación: 500 lb/in²
- Material: Acero inoxidable

5.1.8 Anillos de acoplamiento. Estas piezas permiten instalar el equipo sobre una tubería bridada de 4 pulgadas de diámetro. Sus características principales son:

- Diámetro interior: 3 in
- Presión máxima de operación: 500 lb/in²
- Material: Acero inoxidable y/o Acero al carbón
- Acoplamiento: Brida estandar de 4 in 150 lb/in² Tipo RTJ

5.1.9 Empaque de sello. Estos garantizan la hermeticidad del equipo una vez instalado sobre la línea de prueba. Sus características principales son:

- Diámetro interior: 3 in
- Presión máxima de operación: 500 lb/in²
- Material: Garlock

5.1.10 Válvula para Muestreo. Por medio de esta válvula, se extraen las muestras del líquido residual para su análisis. Sus características principales son:

- Tipo: Globo
- Diámetro de paso: ½ in
- Conexiones: ½ NPT
- Presión máxima de operación: 500 lb/in²
- Material: Acero inoxidable

5.1.11 Cilindros Muestreadores. En estos recipientes se almacenarán las muestras de crudo, para sus correspondientes análisis PVR y caracterización. Sus características principales son:

- Capacidad: 1 L
- Presión máxima de operación: 1800 PSI
- Material: Acero inoxidable
- Conexiones: ½ NPT

5.2 CARACTERÍSTICAS Y REQUERIMIENTOS DE UNA BATERÍA DE SEPARACIÓN PARA LA PRUEBA.

En función de la problemática existente en ciertos tipos de aceite para ser estabilizados y de acuerdo a las propias características del equipo ultrasónico, a continuación se listan los parámetros y requerimientos establecidos, que debe cumplir una batería de separación, para evaluar los efectos que el ultrasonido tiene sobre un aceite no estabilizado.

- API mayor de 35 grados. Debido a que los aceites ligeros presentan mayor problema de estabilización.
- Porcentaje de agua menor de 5%. Para estudiar mejor los efectos que el ultrasonido tiene sobre una muestra de hidrocarburos, ya que se ha comprobado que el ultrasonido promueve la formación de emulsiones agua-aceite, factor que podría alterar algunas propiedades físicas de los hidrocarburos líquidos y, paralelamente, harían más difícil la observación del fenómeno ultrasónico.
- Gasto de aceite igual o menor de 400 BPD. Debido a que el tiempo de residencia mínimo con excitación ultrasónica es de 5 segundos.
- Flujo continuo. Los transductores ultrasónicos no deben operar sin líquido, ya que el fluido es el medio de transmisión de la energía.

- Contar con un separador para medición de baja presión. Con objeto de alterar lo menos posible la operación normal de la batería.
- Diámetro nominal de la línea de descarga de 3-4 in. Debido a que el diámetro interior de los transductores radiales es de 3 in y se pretende evitar altas caídas de presión para no alterar las condiciones de flujo.
- Contar con suministro de energía eléctrica. Para la operación del equipo es necesario contar con suministro de energía eléctrica, con la finalidad de que no afecte el funcionamiento de la batería. Los requerimientos son energía eléctrica monofásica de 125 Volts y 60 Amperes, o una planta independiente de 125KVA:

Se plantearon varias alternativas y posibilidades diversas para la realización de la prueba de campo, todas con un objetivo común: estabilizar el aceite promoviendo la liberación del gas disuelto en los hidrocarburos, y determinar las condiciones óptimas de operación del sistema. Esto se conseguirá mediante el monitoreo continuo, de los componentes de las fases gaseosa y líquida a la salida del separador y/o tanque de almacenamiento, y con la determinación de la PVR de la fase líquida. En la Figura 5.2 se muestra la propuesta más adecuada para la prueba del sistema.

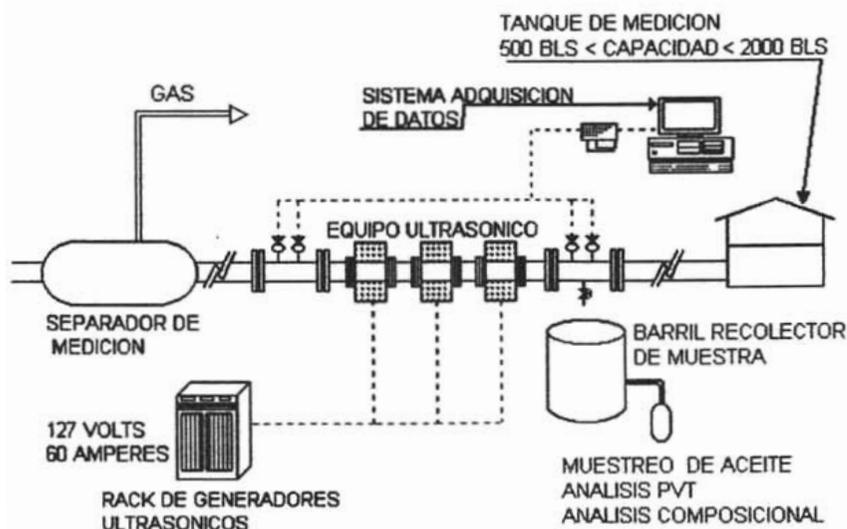


FIGURA 5.2 DIAGRAMA DEL SISTEMA

5.3 PROGRAMA PARA LA PRUEBA TECNOLÓGICA EN CAMPO.

Con el fin de realizar las pruebas de campo con el equipo ultrasónico se programaron las siguientes actividades.

5.3.1 Investigación de la instalación propicia para la Prueba

- Nombre de la batería
- Ubicación física y ruta de llegada
- Diagrama general de la batería
- Revisión del informe mecanizado de la producción
- Análisis composicionales, caracterización fisico-química y PVR de los hidrocarburos que produce

5.3.2 Definición de la sección o área de la batería, apropiada para la instalación del sistema.

- Definición de la ubicación exacta
- Análisis de las modificaciones físicas requeridas

5.3.3 Prueba de aforo.

- Selección del pozo, en función de las condiciones ideales
- Medición del gasto de aceite y gas producido
- Toma de muestras para su análisis composicional, caracterización fisico-química y PVR

5.3.4 Modificaciones requeridas para la instalación del sistema.

- Ejecución o realización de cambios
- Validación de las modificaciones

5.3.5 Instalación del sistema ultrasónico.

- Montaje del equipo ultrasónico
- Alimentación eléctrica
- Instalación del "Rack" de generadores y sistema adquisitor de datos
- Preparación y montaje del equipo para obtención de muestras

5.3.6 Puesta en marcha del sistema de producción sin accionar equipo ultrasónico.

- Alinear pozos
- Monitorear presión y temperatura
- Medir gastos de aceite y gas producidos
- Toma de muestras para análisis composicional, caracterización fisico-química y PVR

5.3.7 Puesta en marcha del sistema de producción accionando equipo ultrasónico.

- Alinear pozos
- Monitorear presión y temperatura
- Medir gastos de aceite y gas producidos
- Toma de muestras para análisis composicional, caracterización fisico-química y PVR

5.3.8 Realización del análisis.

- Composicional
- Caracterización fisico-química
- PVR

5.4 CARACTERÍSTICAS DE LA BATERÍA BELLOTA.

La batería Bellota es alimentada por pozos del campo Bellota. En la sección de medición de la batería se cuenta con separador vertical de baja presión y un separador elevado horizontal de baja presión, con tubería de descarga de 4 pulgadas de diámetro nominal. Presenta también, la atractiva posibilidad de que pueden ser alineados uno o varios pozos hacia este separador, sin que se vea afectada la operación normal de la batería. La línea de descarga de la sección de medición alimenta un tanque de medición con capacidad de 10,000 barriles.

El campo Bellota es un yacimiento de aceite volátil, siendo este tipo de aceite el que presenta mayor problema de estabilización, su densidad API promedio es de 39 grados y la mayoría de sus pozos producen con bajo porcentaje de agua.

TABLA 5.1 CORRIENTES DE LLEGADA A LA BATERÍA

FECHA	POZO	PRODUCCIÓN DE ACEITE		AGUA %	RGA M ³ /M ³	RGIL M3/M3	GAS TOTAL M ³ /D	ESTRAN-GULADOR
		BRUTA M ³ /D	NETA M ³ /D					
19/07/98	1-A	216	207	0.40	663		137,241	7/8
10/07/98	12-A	92	92	0.40	618		56,856	7/8
10/07/98	23	80	80	0.80	1014		81,120	½
24/06/98	41	185	177	4.30	327		57,879	½
24/06/98	63	241	233	3.30	315		73,395	5/8
18/07/98	116-A	170	170	0.80	234		39,780	¾
06/07/98	118	9	9	0.00	154		1,386	3/16
05/07/98	126	161	159	1.00	237		37,683	5/8
15/06/98	136	131	131	0.00	69	77	9,039	INY.N2
10/07/98	158	286	286	0.40	369		105,534	3/8-5/8
06/07/98	158-D	287	286	0.40	246	77	70,356	INY.N2
24/06/98	159	376	376	1.00	266		100,016	7/8

5.5 MODIFICACIONES EN LA BATERÍA BELLOTA PARA LA PRUEBA.

En las fotografías 5.5 a 5.8 se muestran a detalle las modificaciones que se realizaron, para la instalación del sistema ultrasónico para estabilización de crudo, para la prueba experimental en la Batería Bellota.



FIGURA 5.3 BATERIA BELLOTA

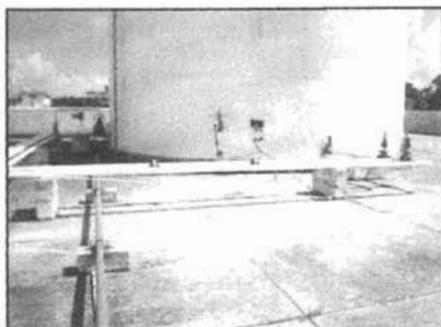


FIGURA 5.4 LINEAS DE PRODUCCIÓN

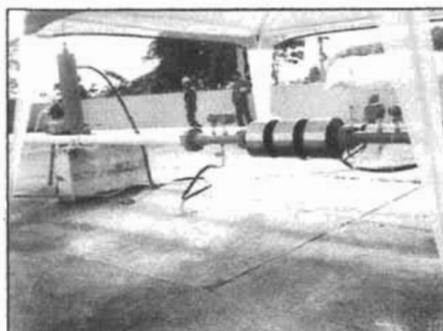
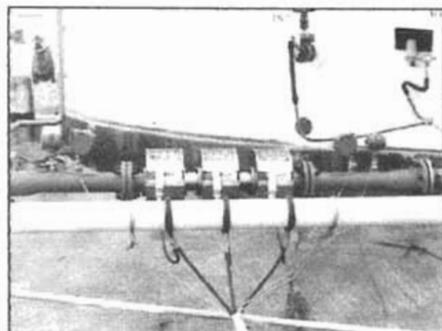


FIGURA 5.5 INSTALACION DEL SISTEMA ULTRASONICO

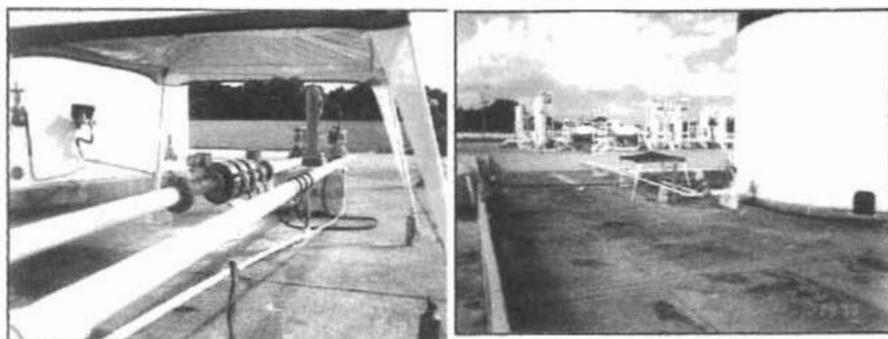


FIGURA 5.6 PREPARACIÓN DE LA PRUEBA.

5.6 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA TECNOLÓGICA DE CAMPO.

Para cuantificar el empleo de un sistema ultrasónico para estabilización de petróleo crudo, se consideraron los siguientes parámetros;

- a) Mediciones que son significativas en cuanto a la tendencia por ejemplo: la PVR, la densidad API, los gastos de gas, etc.
- b) Análisis composicionales del líquido y, con base en estos, la cuantificación de la PVR.

El parámetro más común para indicar la estabilización de crudo es la Presión de Vapor de Reid, sin embargo, esta es una medición muy controversial ya que no es un indicador absoluto, ni consistente. De cualquier manera, se utilizó como referencia para la estabilización, teniendo en especial cuidado en la realización del método para medir la PVR y agregándole la recalibración de los manómetros en cada medición, estas mejoras al método nos garantizan mediciones confiables para la comparación.

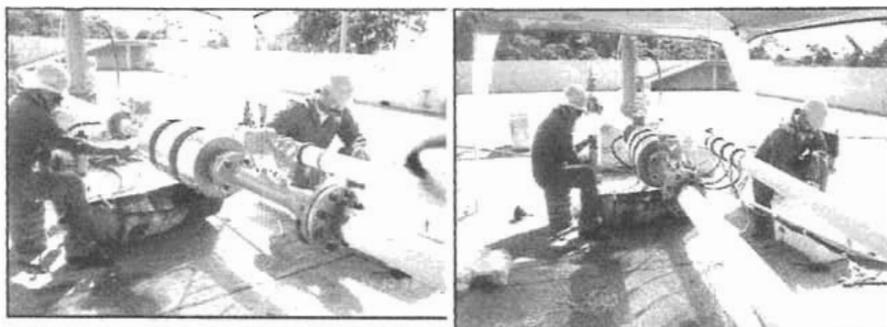


FIGURA 5.7 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA ULTRASÓNICA

Otra medida de referencia lo es la densidad API, ya que una variación en este parámetro nos indicaría la alteración composicional del hidrocarburo. En este sentido, las expectativas con las que denoten variación en la disminución de la densidad después de la aplicación del ultrasonido.

A manera de apoyo para la interacción del ultrasonido en el hidrocarburo, se realizó la medición del gas, que se produce cuando el sistema funciona sin ultrasonido y compararlo con el gas que produce el sistema, cuando se emplea la energía ultrasónica.

Finalmente, Los análisis más significativos, respecto a la acción del ultrasonido, son los análisis composicionales del líquido, los cuales pueden mostrar de manera cuantitativa las variaciones que los hidrocarburos presentan ante la no exposición y la exposición del ultrasonido, además de constituir la base para la estimación teórica de la presión de vapor verdadera (PVV).

5.7 PROBLEMÁTICA DE CAMPO EN LA OPERACIÓN DE LA PRUEBA

En esta sección se mencionan los problemas más relevantes que se presentaron durante la realización de las pruebas en campo con el equipo ultrasónico para la estabilización de petróleo crudo.

1. Las condiciones climáticas juegan un papel importante, en este caso durante la realización de las pruebas de campo, con el equipo

ultrasónico, se tuvo la necesidad de suspenderlas durante dos días por la presencia de una tormenta tropical, el equipo cuenta con elementos electrónicos expuestos como son: transductores radiales, transmisor de temperatura, transmisor de presión y sistema de adquisición de datos (computadora), estos elementos pueden sufrir daño al quedar expuestos a la lluvia y la presencia de viento excesivo, de la misma forma para el personal resulta difícil el manejo del equipo.

Este problema fue previsto antes de la realización de la prueba en campo si embargo PEMEX no permitió la instalación de una cabina en el lugar destinado para la realización de la misma, por considerar que esto implicaba mas modificaciones a la batería Bellota, permitiendo sólo la instalación de equipo portátil desmontable.

2. El traslado, de los recipientes muestreadores, de la batería Bellota al laboratorio de yacimientos, representa un trabajo delicado, en cuanto a su manejo y preservación con hielo. El tiempo para tomar la muestra y el número de muestras representa también otro parámetro que esta limitado a la capacidad y equipo con que cuenta el laboratorio en el que se realizan los análisis.
3. El tiempo de óptimo de residencia, con excitación ultrasónica para el crudo, debe ser de 5 segundos como mínimo, esto implica un gasto de 400 BPD por la línea donde se instala el equipo ultrasónico y que descarga al tanque de almacenamiento, no se tiene el control absoluto de el gasto, el motivo son los pozos que tienen implantado bombeo neumático, ya que el aporte de crudo de estos pozos no es un flujo constante. Esta es la razón principal de la variación de flujo y como consecuencia la variación de el tiempo de residencia del crudo.

Tomar la decisión correcta y oportuna para dar solución a cada problemática mencionada, contribuyó al éxito de la prueba ultrasónica en campo y a la obtención de resultados confiables.

5.8 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN CAMPO CON EL SISTEMA ULTRASÓNICO.

Se programaron y se realizaron 16 pruebas , es decir, 4 pruebas con la producción de cada uno de los pozos Bellota 1A, 23 y 41, y 4 pruebas con una corriente formada con el Bellota 1A y 23.

Se realizaron los análisis físico-químicos de las muestras obtenidas en todas las pruebas.

TABLA 5.2 PRUEBAS DE API.

Prueba	Tipo	Fecha	Flujo	PVR (Cilindro) Lab. Central
1	A sin ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	47,51
2	A con ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	46,87
3	B sin ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	47,27
4	B con ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	47,42
5	A sin ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	42,20
6	A con ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	42,06
7	B sin ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	41,87
8	B con ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	42,04
9	A sin ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	39,38
10	A con ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	39,35
11	B sin ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	39,40
12	B con ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	39,29
13	A sin ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	43,10
14	A con ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	42,94
15	B sin ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	42,79
16	B con ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	43,03

TABLA 5.3 CARACTERIZACIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO DEL POZO BELLOTA 23(P1-P4) Y 1A(P5-P8)

PRUEBA	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7		P8	
	SVU	CU	DF	DF %	SVU	CU	DF	DF %	SVU	CU	DF	DF %	SVU	CU	DF	DF %
PEÑO MOLECULAR	70	70	10000	0.00	85	80	0.0000	3.00	200	200	0.0000	0.00	200	200	0.0000	0.00
FACTOR DE CARACTERIZACIÓN	0.7965	0.7834	0.0000	0.00	0.7877	0.7870	0.0000	0.00	0.8000	0.8000	0.0000	0.00	0.8000	0.8000	0.0000	0.00
GRAVEDAD API	42.51	42.87	0.0000	0.00	42.27	42.42	0.0000	0.00	42.20	42.2	0.0000	0.00	42.20	42.2	0.0000	0.00
VISCOSIDAD SU A 211°C	550	32.25	4.1500	0.46	32.21	32.24	0.0000	0.00	36.11	36.08	0.0000	0.00	36.21	36.00	0.0000	0.00
VISCOSIDAD SU A 27.2°C	29.2	24.4	0.2000	0.00	29.8	30.2	0.0000	0.00	33.87	33.84	0.0000	0.00	32.70	33.51	0.0000	0.27
VISCOSIDAD QUÍMICA A 211°C	1.97	1.98	0.0000	0.01	2.02	2.00	0.0000	0.00	2.21	2.22	0.0000	0.00	2.09	2.08	0.0000	0.00
VISCOSIDAD QUÍMICA A 27.2°C	1.878	1.892	0.0000	0.00	1.877	1.912	0.0000	0.00	2.069	2.061	0.0000	0.00	2.098	2.055	0.0000	2.00
VISCOSIDAD DINÁMICA A 27.2°C	1.82	1.84	0.0000	0.00	1.84	1.94	0.0000	0.00	1.846	1.839	0.0000	0.00	1.885	1.833	0.0000	1.24
TEMPERATURA DE ENFLAMACIÓN	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
TEMPERATURA DE CONGELACIÓN	-26.0	-46.0	0.0000	-20.00	-30	-57	27.0000	-80.00	-20.0	-24.0	0.0000	-20.00	-20.0	-25.0	0.0000	0.00
TEMPERATURA DE ESCORPIAMIENTO	< 2	71.5	0.0000	0.00	72.3	73.1	0.0000	0.00	72.3	71.8	0.0000	0.00	69.3	69.8	0.0000	0.14
AGUA Y SEDIMENTO	% V	< 0.05	< 0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
AGUA POR DESTILACIÓN	% V	< 0.05	< 0.05	0.05	0.05	< 0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
SEDMENTO POR EXTRACCIÓN	% P400	0.04	0.03	0.0000	25.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CONTENIDO DE SAL	mg/1000 lb	1.25	2.22	0.8700	44.44	2.12	1.25	0.7700	36.32	0.70	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PRESIÓN DE VAPOR NEGRO	mmHg	0.80	0.20	0.0000	0.00	0.8	0.9	0.0000	0.00	0.8	0.9	0.0000	0.00	0.8	0.9	0.0000
INSOLUBLES EN ALHEPTANO	% P400	0.51	4.34	0.2700	41.46	1.77	3.26	0.0000	48.50	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PAQUENIA TOTAL	% P400	0.95	0.57	0.0000	1.95	0.88	0.88	0.0000	2.07	0.95	0.88	0.0000	1.92	0.22	0.0000	2.07
CARBÓN PANGLOSSOM	% P400	0.26	0.07	0.0000	1.82	0.89	0.89	0.0000	4.81	0.91	0.89	0.0000	4.79	0.22	0.0000	4.70
CARBÓN COMPARISON	% P400	0.78	0.7	0.0000	7.89	0.92	0.87	0.0000	0.63	0.96	1.0	0.0000	4.07	0.93	1.03	0.0000
AZUFRE TOTAL	% P400	0.487	0.445	0.0000	0.82	0.465	0.468	0.0000	4.36	0.458	0.583	0.2270	0.285	0.488	0.295	0.2000
INTRODUCIDO TOTAL	ppm P400	82	75	12.0000	2.96	71	80	3.0000	7.00	83	83	4.0000	227.000	12.94	388	351
INTRODUCIDO BÁSICO	ppm P400	29	40	0.0000	0.00	40	37	0.0000	0.00	42	87	0.0000	0.00	82	82	0.0000
ÁCIDO SALIFÉRICO	ppm P400	4	7	0.0000	0.00	13	23	0.0000	0.00	5	21	0.0000	0.00	22	17	0.0000
MEQUICARTANOS (R-SH)	ppm P400	26	23	0.0000	0.00	13	23	0.0000	0.00	26	23	0.0000	0.00	22	17	0.0000
NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN	mg/1000 lb	0.08	0.03	0.0000	0.250	0.02	0.07	0.0000	0.00	0.11	0.13	0.0000	0.00	0.05	0.13	0.0000
CEWAS	% P400	0.005	0.0013	0.0000	0.03	0.0096	0.009	0.0000	0.00	0.0046	0.0046	0.0000	0.00	0.0042	0.0042	0.0000
PODER CALIFORNICO BRUTO	BTU/lb	8532	8577	261.000	4.26	8468	8902	0.0000	0.00	8540	8335	0.0000	0.00	8462	84.0000	0.00
(1) AUMENTO SU VALOR (2) DISMINUYO SU VALOR																

TABLA 5.4 CARACTERIZACIÓN DE ACEITE CRUDO DEL POZO
BELLOTA 41(P9-P12) Y 1A-23(P13-P16)

PRUEBA	P9		P10		P11		P12		P13		P14		P15		P16		
	SAU	CUV	DF	DF %	SAU	CUV	DF	DF %	SAU	CUV	DF	DF %	SAU	CUV	DF	DF %	
PESEO MOLECULAR	220	220	0.0000	0.00	205	200	0.0000	2.44	95	90	0.0000	5.90	92	95	0.0000	-1.08	
FACTOR DE CARACTERIZACIÓN	0.25	0.25	0.0000	0.00	0.185	0.185	0.0000	0.00	0.185	0.185	0.0000	0.00	0.185	2	-0.0000	-0.42	
PESEO ESPECIFICO 20M °C	0.8242	0.8243	-0.0001	-0.01	0.8241	0.8248	-0.0006	-0.06	0.8096	0.8073	0.0023	0.01	0.8080	0.8083	-0.0003	-0.01	
GRAVEDAD API	°API	29.28	29.25	0.0000	0.01	29.40	29.25	0.0000	0.13	43.90	42.94	0.9600	0.97	42.79	43.02	-0.2300	-0.56
VISCOSIDAD SUI A 21°C	SSU	40.92	43.38	-2.4696	-6.01	38.40	38.42	0.2000	1.02	35.82	34.80	1.0200	2.85	35.72	35.99	-0.2700	-0.64
VISCOSIDAD SUI A 37.2°C	SSU	36.67	36.77	-0.0000	-0.27	36.28	36.21	0.0070	0.19	33.08	33.21	-0.1300	-0.29	33.28	33.36	-0.0800	-0.24
VISCOSIDAD CINEMATICA A 85°C	Cst	4.95	5.28	-0.3300	-6.67	4.46	4.48	0.0000	0.07	3.8	3.8	0.0000	0.01	3.39	3.4	-0.0000	-0.28
VISCOSIDAD CINEMATICA A 21°C	Cst	4.95	5.02	-0.0600	-1.21	4.92	4.99	0.0000	0.07	2.98	2.87	0.1100	0.40	2.85	3.02	-0.0700	-2.27
VISCOSIDAD CINEMATICA A 35.0°C	Cst	4.07	4.47	-0.4000	-9.83	3.63	3.67	-0.0400	-1.10	2.73	2.46	0.2700	0.91	2.77	2.9	-0.0000	-1.89
VISCOSIDAD DINAMICA A 37.2°C	Cp	2.811	2.837	-0.0260	-0.91	2.838	2.823	0.0000	0.09	1.687	1.791	-0.1040	-2.40	1.772	1.844	-0.0720	-2.48
TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN	°C	<-2	<-2		<-2	<-2			<-2	<-2			<-2	<-2			
TEMPERATURA DE CONGELACIÓN	°C	4.0	-8.0	0.0000	190.00	-0.0	-3.0	-0.0000	70.00	-8.0	-27.0	0.0000	-90.00	-8.0	-8.0	0.0000	0.00
TEMPERATURA DE ESCURRIMIENTO	°C	-3.0	-2.0	0.0000	300.00	-4.0	0.0	-0.0000	70.00	-8.0	-3.0	0.0000	-40.00	-5.0	-8.0	0.0000	0.00
TEMPERATURA DE ANILINA	°C	71.6	79.3	-7.7000	1.02	71.2	71.2	0.0000	0.00	72	72.2	-0.2000	-0.29	73.8	71.3	4.5000	5.84
AGUA Y SEDIMENTO	X/Y	<0.05	0.20		0.80	0.80			0.60	0.2			0.25	0.20			
AGUA POR DESTILACIÓN	X/Y	<0.05	0.05		0.80	0.05			0.80	0.05			<0.05	0.1			
SEDIMENTO POR EXTRACCIÓN	X/Peso	0.03	0.05	0.0000	0.07	0.05	0.0000	0.0000	0.08	0.08	0.0000	0.0000	0.23	0.08	0.0000	0.0000	
CONTENIDO DE SAL	Barril/BA	1.53	5.00	-3.4700	-226.80	2.22	2.2	0.0000	4.90	21.5	4.95	17.2500	80.75	20	3.00	77.0000	80.00
PRESIÓN DE VAPOR PEG	Bbq/g	9.9	9.3	0.6000	0.05	9.7	9.3	0.4000	4.0	9.0	9.1	-0.1000	-0.7	9.0	9.5	-0.5000	-5.95
INSOLUBLES EN n-HEPTANO	% P/Peso	0.0	0.34	-0.3400	-240.00	0.42	0.26	0.8000	38.90	0.24	0.27	0.0000	-84.07	0.8	0.11	0.6700	38.88
PARAFINA TOTAL	% P/Peso	0.29	0.22	0.0700	0.75	0.85	0.3	-0.0500	-1.91	0.78	0.95	0.2000	2.35	0.89	0.33	0.5800	3.72
CARGEN PARABOTTOM	% P/Peso	0.91	1.09	-0.1800	-18.78	1.02	1.0	-0.0000	-2.94	0.89	0.97	0.0000	1.82	0.97	0.97	0.0000	0.00
CARGEN COMBOSON	% P/Peso	0.93	1.2	-0.2600	-20.43	0.95	0	-0.0000	-4.25	1.01	1.01	0.0000	0.00	1.01	1.01	0.0000	0.00
AZUFRE TOTAL	% P/Peso	0.821	0.754	0.0670	8.35	0.771	0.792	-0.0000	-1.41	0.298	0.279	0.0000	0.28	0.753	0.428	0.3250	43.81
NITRÓGENO TOTAL	ppm/Peso	389	383	26.0000	0.88	320	325	-8.0000	-4.88	92	95	7.0000	3.00	225	296	-71.0000	-21.95
NITRÓGENO BÁSICO	ppm/Peso	97	85	12.0000	12.37	80	94	-14.0000	-17.79	31	27	4.0000	12.90	79	74	5.0000	8.23
ACIDO SULFÚRICO	ppm/Peso	9	5	2.0000	11.1	9	5	4.0000	11.05	12	4	-2.0000	-8.67	34	28	6.0000	17.85
MERCAPTANOS (R-SH)	ppm/Peso	22	34	-2.0000	-4.37	30	31	-1.0000	-3.23	20	22	-2.0000	-8.00	34	28	6.0000	17.85
NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN	mg KOH/g	0.68	0.67	0.0000	0.50	0.67	0.68	-0.0000	-0.47	0.11	0.68	0.0000	8.80	0.67	0.68	-0.0000	-4.29
CEWAS	X/Peso	0.0002	0.0001	-0.0001	-80.39	0.0043	0.0003	-0.0001	-0.235	0.0024	0.0003	0.0003	-80.39	0.0048	0.0005	-0.0007	-4.95
PODER CALORIFICO BRUTO	BTU/lb	19302	19271	31.0000	0.16	19302	19295	-7.0000	-0.22	19174	19383	50.0000	0.65	19253	19414	-161.0000	-4.32

(-) AUMENTO SU VALOR (+) DISMINUYO SU VALOR

TABLA 5.5 PRUEBAS DE PVR

Prueba	Tipo	Fecha	Flujo	PVR (psi)	Diferencia (psi)	Porcentaje (%)	Observaciones
1	A sin ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	9,5			
2	A con ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	8,6	-0,9	-10,5	
3	B sin ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	9,1			
4	B con ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	9,0	-0,1	-1,1	
5	A sin ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	7,7			
6	A con ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	7,2	-0,5	-6,9	
7	B sin ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	7,4			
8	B con ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	6,9	-0,5	-7,2	
9	A sin ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	9,1			
10	A con ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	8,5	-0,6	-7,1	
11	B sin ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	8,7			
12	B con ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	8,5	-0,2	-2,4	
13	A sin ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	8,0			
14	A con ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	7,5	-0,5	-6,7	
15	B sin ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	8,6			
16	B con ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	6,9	-1,7	-24,6	

Prueba Tipo A: SAMP - 94MP - TM
 Prueba Tipo B: SAMP - TM

TABLA 5.6 TIEMPOS DE RESIDENCIA EN EL TRANSDUCTOR

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO ULTRASONICO PARA ESTABILIZACIÓN DE CRUDO			
DIÁMETRO INTERIOR: 2.9" (7.37 cm)			
LONGITUD: 38.6" (98.0 cm)			
PRUEBA	PRODUCCIÓN (bl/día)	VELOCIDAD DE FLUJO (m/min)	TIEMPO DE RESIDENCIA (seg.)
1, 2, 3 y 4	347,96	9,02	6,65
5, 6, 7 y 8	1.242,71	32,20	1,86
9,10, 11 y 12	1.143,30	29,62	2,03
13, 14, 15 y 16	1.590,67	41,22	1,46

TABLA 5.7 PRUEBAS DE GASTOS DE GAS.

Producción de Gas medida con referencia a 17 litros de líquido producido.								
Prueba	Tipo	Fecha	Flujo	Producción BPD	Gasto de Gas LL	Tiempo	RGA	Observaciones
1	A sin ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	348	29,970	0:11:09	1,8	
2	A con ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	348	36,896	0:11:22	2,2	incremento 6.93 lbs., 23.1% mas
3	B sin ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	348	33,752	0:19:37	2,0	
4	B con ultrasonido	06-nov-98	Bellota 23	348	35,273	0:24:13	2,1	
5	A sin ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	1.243	29,282	0:10:12	1,7	
6	A con ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	1.243	28,616	0:08:57	1,7	disminuyo 0.66 lbs., 2.3% menos
7	B sin ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	1.243	36,718	0:08:38	2,2	
8	B con ultrasonido	09-nov-98	Bellota 1A	1.243	37,672	0:08:28	2,2	incremento 1.15 lbs., 3.1% mas
9	A sin ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	1.143	35,464	0:11:21	2,1	
10	A con ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	1.143	42,198	0:10:48	2,5	incremento 6.73 lbs., 19.0% mas
11	B sin ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	1.143	32,418	0:10:01	1,9	
12	B con ultrasonido	10-nov-98	Bellota 41	1.143	37,716	0:11:28	2,2	incremento 5.30 lbs., 16.3% mas
13	A sin ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	1.591	26,670	0:12:34	1,8	
14	A con ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	1.591	38,318	0:11:17	2,3	incremento 11.65 lbs., 43.7% mas
15	B sin ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	1.591	35,308	0:19:06	2,1	
16	B con ultrasonido	12-nov-98	Bellota 1A y 23	1.591	36,808	0:09:29	2,2	incremento 1.30 lbs., 3.7% mas

Prueba Tipo A: 20BSP - 20ABP - 17L
Prueba Tipo B: 20BSP - 17L

* 1 Dato a 8 litros de Bellota y multiplica por 17 litros.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO VI

6.1 CONCLUSIONES

La prueba tecnológica del Sistema Ultrasónico para Estabilización de Crudo cumplió con dos objetivos fundamentales, el primero fue instalar y probar la tecnología del ultrasonido en una batería de producción, no tenemos ninguna referencia de que se haya utilizado el ultrasonido para fines de estabilización. El segundo, estimar la eficiencia del ultrasonido como medio estabilizador.

Considero que la instalación y prueba del sistema en la Batería Bellota fue exitosa, ya que se superaron todos los problemas técnicos para hacer funcionar el sistema en una línea de producción por más de dos semanas, lo que permitió realizar múltiples pruebas cambiando el flujo y variando las condiciones de producción. Antes de realizar la prueba tecnológica existía incertidumbre acerca del uso de la energía ultrasónica en una batería y, aunque se habían realizado varias pruebas en laboratorio, se desconocía si pudiera hacerse operar esta tecnología en campo, cumpliendo con el primer objetivo.

En cuanto al segundo objetivo, estimar la eficiencia del ultrasonido, la mecánica fue la de revisar los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a muestras de hidrocarburos obtenidos en la batería, antes y después de emplear ultrasonido. Para este punto se realizaron los análisis de Presión de Vapor Reid (PVR) y la caracterización físico-química del crudo, no pudiendo obtenerse los resultados de composición del líquido.

Los resultados de la caracterización y PVR de 8 pruebas comparativas (16 pruebas en total), mostraron que existen variaciones en los resultados de los análisis de las muestras a las cuales se les aplicó ultrasonido, bajó la PVR, bajando los °API y se incrementó la producción de gas.

Analizando los resultados de la primera prueba, durante la cual se tuvieron condiciones de flujo continuo, velocidades bajas de flujo, bajo porcentaje de agua y alto API, se pudieron observar resultados muy interesantes, por ejemplo bajo la PVR 10.5%, es decir, cambió de 9.5 a 8.6 lb/pg².

Así mismo, los °API se redujo 0.9%, en este caso cambió de 48.02 a 47.57. Además, el al realizar la medición con un gasómetro (Ritter con capacidad de 60 L/h) conectado después del separador portátil que se conecto a la válvula

muestreadora ver Figura 5.1, se observó un incremento en la producción de gas del orden de 29.1%.

En resumen, se puede concluir que, a través de la prueba tecnológica se instaló y probó un sistema ultrasónico para estabilizar crudo y fue posible determinar que el crudo estimulado tuvo variaciones en forma consistente, las cuales fueron favorables, lo que nos indica que el ultrasonido se puede considerar como una tecnología alternativa para la estabilización de crudo.

6.2 RECOMENDACIONES

Se puede programar la optimización de la producción de una batería instalando de manera permanente un equipo ultrasónico para estabilización de crudo. Comparar la producción de líquido, ya que al estar más estabilizado evapora menos gas en el tanque, y comparar la producción de gas y condensados, ya que al pasar el crudo por el ultrasonido, éste liberará una mayor cantidad de gas.

Es importante mencionar que los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio y en campo se presentan en este trabajo con el fin de recabar datos y así caracterizar el comportamiento del crudo cuando es irradiado por ondas ultrasónicas, con la herramienta ultrasónica que fue diseñada en el IMP y que requiere de la ecuación obtenida por análisis dimensional para identificar este fenómeno y poder predecir diferentes eventos que ocurren al liberar el gas disuelto en el crudo al emplear esta herramienta, como medio para estabilizar el crudo con mayor rendimiento y eficiencia.

LISTA DE FIGURAS

Nº DE FIGURAS	PÁGINAS
1.1.- Diagrama de flujo del sistema de producción para aceite volátil.	14
2.1.- Torre de destilación	19
2.2.- Esquema de un separador vertical.	27
2.3.- Esquema de un separador horizontal.	28
3.1.- Pulso de onda transversal en un muelle.	40
3.2.- Pulso de onda longitudinal en un muelle.	40
3.3.- Onda periódica con movimiento armónico simple.	41
3.4.- Oyente que se acerca hacia la fuente.	44
3.5.- Variables del sistema.	47
3.6.- Potencia vs liberación de gas.	52
4.1.- Diagrama general del banco de pruebas.	55
4.2.- Tendencia de la liberación de ligeros por irradiación Ultrasónica (5 min.).	69
4.3.- Tendencia de la liberación de ligeros por irradiación Ultrasónica (10min.).	69
4.4.- Presión vs potencia resultante de la prueba 1.	73
4.5.- Presión vs potencia resultante de la prueba 2.	75
5.1.- Diagrama del equipo ultrasónico.	77
5.2.- Diagrama del sistema.	81
5.3.- Batería Bellota	85

ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO CON ULTRASONIDO
LISTA DE FIGURAS

5.4.- Líneas de producción	85
5.5.- Instalación del sistema ultrasónico	85
5.6.- Preparación de la prueba	86
5.7.- Realización de la prueba ultrasónica	87

LISTA DE TABLAS

Nº DE TABLA	PÁGINAS
3.1.- Símbolos y dimensiones del sistema.	48
4.1.- Resultados de la prueba sobre una columna de liquido.	56
4.2.- Resultados de liberación de gas por incremento de temperatura.	57
4.3.- Resultados de la prueba por decremento de presión.	59
4.4.- Resultados del experimento 1 con estimulación ultrasónica.	60
4.5.- Resultados del experimento 2 con estimulación ultrasónica.	61
4.6.- Resultados de la prueba con estimulación ultrasónica por 4.11 minutos.	64
4.7.- Resultados de la prueba con estimulación ultrasónica por 1.23 minutos.	65
4.8.- Análisis de resultados proporcionados por el Laboratorio Central (irradiación ultrasónica por 5 minutos).	68
4.9.- Análisis de resultados proporcionados por el Laboratorio Central (irradiación ultrasónica por 10 minutos).	68
4.10.- Análisis de resultados proporcionados por el Laboratorio de Yacimientos	70
4.11.- Datos obtenidos durante la prueba 1	72
4.12.- Datos obtenidos durante la prueba 2	74
5.1.- Corrientes de llegada a la batería	84
5.2.- Pruebas de API	89

5.3.- Caracterización de aceite crudo del pozo bellota 23(P1-P4) y 1A(P5-P8)	90
5.4.- Caracterización de aceite crudo del pozo bellota 41(P9-P12) y 1A-23(P13-P16)	91
5.5.- Pruebas de PVR	92
5.6.- Tiempos de residencia en el transductor	92
5.7.- Pruebas de gastos de gas	93

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- American Society for Testing and Materials, 1993: "ESTANDAR ASTM D-323", Pittsburgh, USA.
- 2.- Clavel López J. y Hernández Rojas G, 1996: "SIMULACIÓN Y ANALISIS DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE PETRÓLEO CRUDO", IMP, México, D. F.
- 3.- Francis, W. Sears y Mark W Zemansky, 1998: "FÍSICA UNIVERSITARIA", Addison Wesley Longman de México S.A.
- 4.- Garaicochea Petirena F, 1997: "APUNTES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR DUCTOS", AIMP. México.
- 5.- Gómez Cabrera J, 1997: "APUNTES DE MANEJO DE LA PRODUCCIÓN EN SUPERFICIE", Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 6.- Hernández Rojas G y Cabello Martínez L, 1996: "COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN DE ACEITE CRUDO MEDIANTE SIMULACIÓN COMPOSICIONAL", UNAM, México.
- 7.- Instituto Mexicano del Petróleo, 1990: "MANUAL DE OPERACIÓN DE TORRES DE DESTILACIÓN", México.
- 8.- James E. Brady, 1980: "QUÍMICA BÁSICA PRINCIPIOS Y ESTRUCTURA", Limusa, México.
- 9.- Paúl A. Triper, 1999: "FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA", Reverté, S.A.
- 10.- Perafán del Valle M. 1998: "SISTEMA ULTRASONICO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE CRUDO", Instituto Mexicano del Petróleo México.
- 11.- Rodríguez Nieto R. 1990: "APUNTES DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 12.- Rodríguez Nieto R. 1998: "APUNTES DE PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE YACIMIENTOS", Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 13.- Streeter, V. L. y E. B. Wylie, 1997: "MECÁNICA DE LOS FLUIDOS", Mc Graw Hill, México.
- 14.- José Antonio Lozano Teruel, 1995: "LAS MATEMÁTICAS, FÍSICA Y QUÍMICA (SONIDOS QUÍMICOS)", Lectores@laverdad.es