UNIVERSIDAD VERACRUZANA

Facultad de ingeniería de la construcción y el habitad

Posgrado

Proyecto de intervención profesional:

ANALISIS DE SEPARACIÓN DE FLUJO MULTIFASE AGUA/ACEITE/AIRE MEDIANTE DISPOSITIVO ESTÁTICO HELICOIDAL

Tesis que presenta:

Ing. Diego Arturo Sánchez Montero

Para obtener el grado de:

Maestría en Ingeniería Aplicada

Director de tesis:

Dr. José Alejandro Vásquez Santacruz

Boca del Río, Veracruz, México febrero 2020

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca nacional de estudios de posgrado dentro del programa de la Maestría en Ingeniería Aplicada en la Universidad Veracruzana que me permitió llevar a cabo el proyecto de investigación para concluir con dichos estudios.

A cada una de las personas, amigos y familiares que me acompañaron a lo largo de esta corta pero emocionante aventura llena de altas y bajas, donde aprendí cosas nuevas y recordé cosas que pensé había olvidado.

A cada uno de los profesores que compartieron sus conocimientos conmigo y así poder decir con orgullo que soy Maestro en Ingeniería Aplicada.

Cada experiencia que sucede en nuestras vidas, buena o mala, nos llena poco a poco de conocimiento sobre la vida que llevamos, conocimiento que podemos usar más a delante como herramientas que nos faciliten el camino a través de ella, pero sin importar cuanto conocimiento y que tanto lo podamos aplicar, el estar acompañado de personas ya sean familia o amigos, hacen el camino más fácil, por eso agradezco a esas personas especiales que sin importar lo insoportable y necio que pude ser en esta travesía, me acompañaron sin poner ninguna queja, apoyándome en cada momento.

Una vez alguien me dijo que las cosas buenas o malas que nos pasan son solamente nuestra culpa, me han pasado ambas a lo largo de estos dos años, pero sé que terminar este proyecto está del lado de las cosas buenas y me siento bien al saber que todo fue mi culpa.

Resumen

Uno de los distintos métodos de extracción de petróleo crudo es mediante el sistema hidráulico de levantamiento artificial Jet-Pump, gracias al cual el pozo expulsa principalmente una mezcla de agua, aceite y gas, siendo almacenada en un tanque separador. El problema se presenta cuando se inicia la extracción de agua del tanque, aparentemente separada de la mezcla ya que es reutilizada para ingresarla de nuevo al pozo, para continuar con la extracción de petróleo, sin embargo, el agua aún lleva parte de gas y aceite, lo que reduce la eficiencia de la bomba de inyección. La mala separación de los fluidos en la mezcla multifase, principalmente del gas, tiene un impacto negativo en la producción de petróleo.

Esta investigación describe el estudio y análisis de la separación de un flujo multifásico agua/aceite/aire correspondiente a la similitud que tiene con la mezcla existente en la extracción de un pozo petrolero. Mediante los sistemas de separación por gravedad y con la implementación de un dispositivo estático helicoidal, empleado como separador de la fase gaseosa de la mezcla, con tres diferentes configuraciones.

El análisis de los datos experimentales da como resultado que la mejor configuración del mezclador es mediante 2 elementos colocados a una posición de 10 centímetros por encima de la entrada del tanque separador.

Los resultados experimentales revelan que, aun cuando la separación del agua y el aceite en el tanque separador lleve demasiado tiempo en el caso experimental, para las condiciones reales en planta ese tiempo no es considerable, puesto que en el proceso real se comienza a extraer agua y aceite del tanque hasta que éste se haya llenado, y el tiempo que tarde en hacerlo sea suficiente para que se lleve a cabo una eficiente separación. Sin embargo, esta situación debe valorarse para una implementación práctica. Lo que sin duda es una ventaja, es que la ausencia de gas en la mezcla aumenta la eficiencia de la bomba de inyección del fluido motriz en el sistema de levantamiento artificial hidráulico, mismo que se extrae del mismo tanque en la aplicación real.

Abstract

One of the different methods of extracting crude oil is through the artificial hydraulic lifting Jet-Pump system, thanks to which the well mainly expels a mixture of water, oil and gas, being stored in a separator tank. The problem presents when the extraction of water from the tank begins, apparently separated from the mix since it is reused to be added back to the well, to continue with the extraction of oil. However, the water still contains parts of gas and oil, which then reduces the efficiency of the injection bomb. The incorrect separation of the fluids in the multiphase mix, mainly of the gas, has a negative impact in the production of the petroleum.

This investigation describes the study and analysis of the separation of a multiphase flow of water / oil / air corresponding to the similarity that it has with the existing mixture in the extraction of an oil well. Through gravity separation systems and with the implementation of a helical static device, used as a separator of the gas phase of the mixture, with three different configurations.

Analysis of the experimental data results in that the best mixer configuration is with 2 elements at a position 10 centimeters above the inlet of the separator tank.

The experimental results reveal that, even if the separation of the water and the oil in the separator tank takes too much time in the experimental case, for real conditions this time is not considerable, because in the real process water and oil are extracted until it has been filled, and while it is filling up, there is enough time for an efficient separation of the fluids. However, this situation needs to be valued for a practical implementation. What is, without a doubt, an advantage is that in the absence of gas in the mix increases the efficiency of the motor fluid injection pump in the artificial hydraulic lifting system, the same which is extracted from the same tank in a real application.

Contenido

Agradecimientos ii
Resumen iii
Abstract iv
1 Introducción 4
1.1 Planteamiento del problema 4
1.2 Hipótesis 5
1.3 Justificación 5
1.4 Objetivos 6
1.4.1 Objetivo general 6
1.4.2 Objetivos específicos 6
1.5 Antecedentes 7
2 Marco teórico 8
2.1 Jet-Pump y efecto Venturi 8
2.2 Flujos multifásicos 9
2.3 Separadores multifásicos 10
2.3.1 Clasificación de separadores multifásicos 10
2.4 Mezclador estático helicoidal 12
2.5 Propiedades físicas del agua, aceite y aire 13
2.5.1 Densidad y gravedad especifica 13
2.5.2 Densidad de los gases ideales 14
2.5.3 Viscosidad 14
3 Metodología 16
3.1 Propuesta de diseño y mejoramiento de plataforma experimental 16
3.2 Descripción de prueba experimental 20
4 Resultados experimentales 24
4.1 Separación por gravedad (Caso A) 26
4.2 Separación con dispositivo estático helicoidal (Caso B) 31
4.3 Separación con dispositivo estático helicoidal ajustado (Caso C) 34
4.4 Separación con dispositivo estático helicoidal ajustado con reducción a 2 elementos (Caso D) 36
4.5 Eficiencia de la separación 39

5 Resultados y conclusiones 40
6 Referencias 44

Lista de figuras

Figura 2.1 Diagrama esquemático de un sistema de levantamiento artificial con Jet-Pump [2]. *8*
Figura 2.2 Esquema de configuración Venturi [1]. *9*
Figura 2.3 Tipos de tanque separadores multifásicos [6]. *11*
Figura 2.4 Mezclador estático helicoidal KMS [9]. *12*
Figura 3.1 Plataforma experimental. *16*
Figura 3.2 Tanque separador. *18*
Figura 3.3 Válvula para la toma de muestras. *18*
Figura 3.4 Sistema de entrada de aire (gas) a la mezcla. *19*
Figura 3.5 Sistema desviador de gas. *20*
Figura 3.6 Configuración de mezclador estático helicoidal KMS. *21*
Figura 4.1 Dispositivo estático helicoidal de 4 elementos. *24*
Figura 4.2 Posición del mezclador. *24*
Figura 4.3 Comparación de las tres muestras tomadas a los 10, 20 y 30 minutos después de verter totalmente la mezcla en el tanque, de izquierda a derecha respectivamente. Caso A, experimento #1. ..... *25*
Figura 4.4 Capa de mezcla intermedia de agua/aceite/aire aún por separarse. *27*
Figura 4.5 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso A... *29*
Figura 4.6 Comparación de fluidos en capa intermedia de mezcla en función del tiempo, Caso A, experimento #3. ..... *30*
Figura 4.7 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso B... *33*
Figura 4.8 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso C. . *35*
Figura 4.9 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso D. . *38*
Figura 5.1 Gas expulsado del tanque separador, previamente separado al pasar por el mezclador estático helicoidal. *41*
Figura 5.2 Comportamiento promedio de la separación de la capa intermedia de mezcla en los Casos A, B, C y D. *42*

Figura 5.3 Comparación de separación promedio de fluidos en capa intermedia de mezcla en función del tiempo en los Casos A, B, C y D respectivamente. 42

Lista de tablas

Tabla 2.1 Densidades de los fluidos. 15
Tabla 4.1 Condiciones experimentales por caso. 25
Tabla 4.2 Proporciones de mezcla. Caso A. 27
Tabla 4.3 Comportamiento de separación de mezcla. Caso A. 28
Tabla 4.4 Proporciones de mezcla. Caso B. 31
Tabla 4.5 Comportamiento de separación de mezcla. Caso B. 32
Tabla 4.6 Proporciones de mezcla. Caso C. 34
Tabla 4.7 Comportamiento de separación de mezcla. Caso C. 35
Tabla 4.8 Espesor promedio de capa intermedia de mezcla. 37
Tabla 4.9 Proporciones de mezcla. Caso D. 37
Tabla 4.10 Comportamiento de separación de mezcla. Caso D. 38
Tabla 4.11 Fracción de volumen promedio de los Casos A, B, C y D. 39

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad el tema de los combustibles fósiles es de gran interés, siendo el petróleo el más importante, ya que de éste se obtiene una gran cantidad de derivados, utilizados en amplias ramas de la industria como: la automotriz, aeroespacial y marítima, así como para uso doméstico y manejo en la vida diaria. Por esta razón, se han implementado a través de los años gran cantidad de sistemas, cada vez más eficientes tanto para la exploración y perforación de pozos, como para la extracción y transporte del crudo.

Uno de los distintos métodos de extracción de petróleo es mediante el sistema hidráulico de levantamiento artificial Jet-Pump, utilizado principalmente en pozos maduros, donde el gas que éstos contienen no es suficiente para un levantamiento natural; el cual consiste en el aprovechamiento del efecto Venturi [1], el cual consiste en aplicar energía adicional al pozo al agregar un fluido de trabajo (principalmente agua) a una presión determinada y así, obligar a la mezcla de agua, aceite (crudo) y gas, y otras partículas que se encuentren en dicho pozo, como arenas, lodos, etc. a fluir a la superficie [2].

Uno de los procesos importantes que se encuentra precisamente en medio de la extracción y el transporte es la separación del crudo de esa mezcla, ya que es el producto final enviado a las refinerías para su procesamiento y pueda así, lograr convertirse en alguno de los determinados productos derivados del petróleo.

La empresa Nuvoil, la cual emplea el sistema mencionado anteriormente quien utiliza este sistema de levantamiento artificial, encuentra deficiencias en la separación de la mezcla, al usar un tanque de separación por gravedad como proceso de separación.

En estos tanques, ingresa el fluido multifase (la mezcla) que sale del pozo, compuesto por agua, aceite y gas principalmente. Se espera ocurra la separación, solamente por acción de la gravedad y el flujo natural de los fluidos, quedando al fondo el agua, como el fluido más denso, en medio el aceite y en la superficie el gas, puesto que es el más ligero de los tres.

La problemática se presenta cuando se inicia la extracción del agua aparentemente separada de la mezcla ya que es reutilizada para ingresarla de nuevo al pozo para continuar con la extracción de petróleo, sin embargo, el agua aún contiene parte de gas y aceite atrapado que aún no se ha separado, lo que reduce la eficiencia de la bomba de inyección.

1.2 Hipótesis

La eficiencia de la separación de gas en un flujo multifase aumentará al incorporar al sistema un dispositivo estático helicoidal, originalmente usado como mezclador, separando de forma radial la parte menos densa (gas) de la mezcla multifásica agua/aceite/aire, la cual podrá aislarse del flujo multifásico.

1.3 Justificación

Actualmente mucha de la industria mexicana, como la farmacéutica, química, alimenticia, entre otras, utilizan como método particular de separación de sustancias utilizadas en sus procesos de producción, la separación por gravedad, el cual consiste en llenar un tanque con la mezcla del fluido multifásico extraída del pozo y esperar determinado tiempo para que éste se separe por el flujo natural de los fluidos y la pura acción de la gravedad, esto provoca que la separación de la mezcla sea ineficiente.

Uno de los inconvenientes, ocurre cuando después de llenarse el tanque, alrededor de 3 a 4 horas, dependiendo de la capacidad de éste, se reutiliza el agua que está separándose en el fondo del tanque para dirigirla nuevamente al pozo, la cual no está separada completamente, pues aún contiene concentraciones de gas y aceite los cuales reducen la eficiencia de la bomba de inyección.

La mala separación de los fluidos en la mezcla multifase, principalmente del gas, tiene un impacto negativo en la extracción de petróleo puesto que ocasiona mayores gastos en los procesos de refinación en sus diferentes derivados comerciales. El estudiar el comportamiento de la separación de fluidos multifase proporciona información necesaria

para la mejora en el proceso y al aumento de la eficiencia en la separación de la mezcla teniendo como consecuencia la reducción de costos.

Mediante la experimentación se pueden generar datos de interés para la caracterización de la separación de la mezcla, y así obtener datos confiables a cerca del tiempo de separación, comparando los dos procesos, por gravedad y con la implementación de un dispositivo estático helicoidal.

El obtener dicha información ayudará significativamente en los procesos de extracción de crudo, generando conocimiento para la innovación en los procesos de separación de flujos multifase.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar experimentalmente la separación de fases en una mezcla multifásica agua/aceite/aire a través de la comparación de dos métodos: el método básico de separación por gravedad y el método de separación con dispositivo estático helicoidal.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento teórico de fluidos en procesos de separación de flujos multifase.
- Mejora de plataforma experimental para el estudio de separación de flujos multifásicos.
- Realizar experimentación de separación de flujo multifase agua/aceite/aire con proceso de separación por gravedad.
- Realizar experimentación de separación de flujo multifase agua/aceite/aire con proceso de separación con dispositivo estático helicoidal.

- Analizar datos generados a través de las experimentaciones a realizar.
- Proponer una mejora en el proceso de separación mediante la definición de parámetros estructurales del dispositivo.

1.5 Antecedentes

El presente trabajo, consideró información obtenida en investigaciones pasadas realizadas por integrantes de las áreas de formación en ingeniería mecatrónica y maestría en ingeniería aplicada de la Universidad Veracruzana que ayudaron a entender el proceso de separación de fluidos multifásicos.

Se han publicado trabajos donde se ha estudiado el efecto que genera un dispositivo estático helicoidal en un flujo bifásico (agua-aire) por ejemplo, en el titulado, “Análisis de estrategia para la separación y caracterización de flujos multifase” [3]. El dispositivo hace que la fase más densa (agua) se distribuya en la pared de la tubería y la más ligera (aire) se concentre en el centro del ducto sirviendo como un mecanismo de separación para la parte gaseosa que en este caso es representada por aire.

Posteriormente se estudió el efecto generado por el dispositivo estático helicoidal en una mezcla de agua/aceite/aire mediante simulación numérica, dando como resultado que efectivamente la parte gaseosa de la mezcla termina separándose del flujo multifásico bajo ciertas condiciones [4].

Una publicación más, compara el comportamiento de la mezcla en el proceso de separación por gravedad [5], que es como se realiza actualmente en las instalaciones de la empresa y utilizando el dispositivo estático helicoidal, dando como resultados que éste dispositivo efectivamente ayuda a la separación de la mezcla multifásica, obteniendo sus datos tanto de simulación numérica como de la experimentación llevada a cabo en un módulo experimental donde se realiza el proceso lo más parecido a escala del proceso real.

2 Marco teórico

2.1 Jet-Pump y efecto Venturi

El sistema hidráulico de levantamiento artificial Jet-Pump es para la ingeniera petrolera de gran interés debido a sus características de diseño y la producción volumétrica de que puede manejar.

En general, las partes fundamentales del sistema de levantamiento artificial son: un motor de combustión que acciona una bomba hidráulica de pistón; un panel de control; el Jet-Pump, instalado en el fondo del pozo, el cual se introduce a través de la tubería de producción y finalmente un separador horizontal trifásico que contiene la mezcla (petróleo, agua, gas y arena) extraída del pozo [2], el cual es la parte de interés de este trabajo. Este sistema se puede observar en la Figura 2.1.

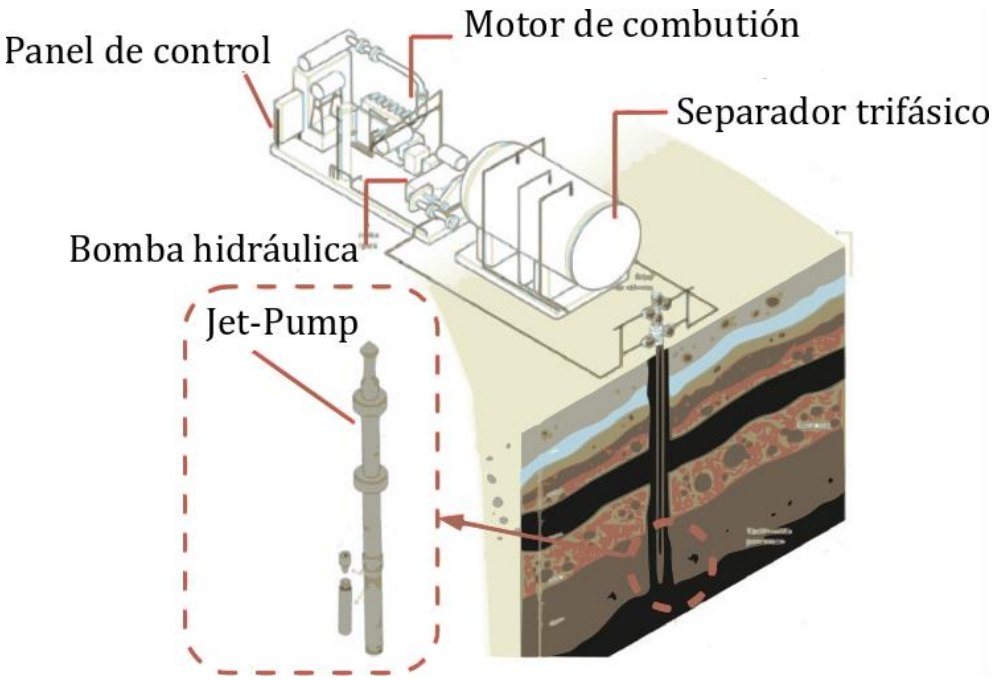

Figura 2.1 Diagrama esquemático de un sistema de levantamiento artificial con Jet-Pump [2].

Fundamentalmente el funcionamiento de un Jet-Pump se basa en el principio Venturi [1], el cual consiste en aplicar energía adicional al petróleo en el fondo del pozo de petróleo [2], a través de expansiones y contracciones cónicas mediante una configuración geométrica [1], para obligar al fluido a fluir hacia la superficie. Para este propósito, se inyecta un fluido de trabajo (agua) a través de la tubería de producción al pozo. Al regreso, la mezcla entre el fluido de trabajo y el aceite se ve obligada a circular a través del espacio anular entre la producción y los tubos de revestimiento [2]; este principio de funcionamiento se muestra en la Figura 2.2.

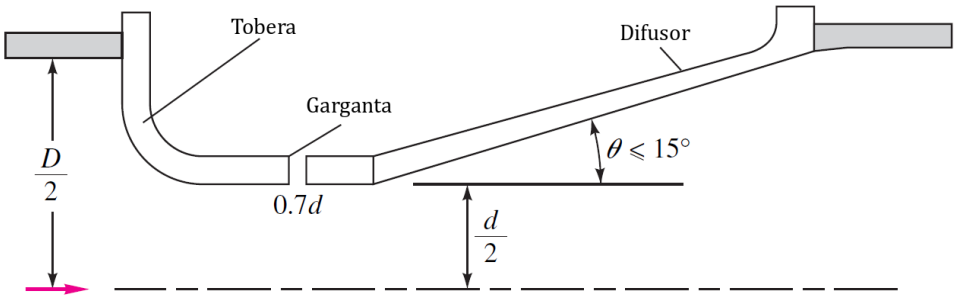

Figura 2.2 Esquema de configuración Venturi [1].

2.2 Flujos multifásicos

Los fluidos multifase son aquellos que están compuestos por 2 o más fluidos que se encuentran en fases diferentes o bien en la misma fase, por ejemplo: liquida, sus propiedades físicas no les permiten mezclarse molecularmente, como el agua y el aceite. Dichos fluidos pueden viajar a través de una tubería como una mezcla homogénea (emulsión) en el caso de líquidos y de forma paralela sin mezclarse, como lo es caso de gas/agua por mencionar algún ejemplo [6].

Los fluidos multifásicos pueden ser [6]:

- Bifásicos: líquido-líquido, líquido-gas y gas-solido.
- Trifásico: líquido-líquido-gas, líquido-gas-solido, etc.

El flujo multifásico (trifásico) petróleo-agua-gas ha sido un fenómeno de fuertes investigaciones debido a su complejidad. Se encuentras 3 principales problemas al tratar de describir un flujo multifásico [7]:

- Al fluir el líquido y el gas dentro de una tubería al mismo tiempo llegan a tomar diferentes formas geométricas, las cuales se denominan patrones de flujo.
- Al considerarse una sola mezcla, esta se vuelve compresible y la presión y la temperatura afectan continuamente su densidad.
- Las perdidas existentes al deslizarse la parte gaseosa a través de la parte líquida de la mezcla.

2.3 Separadores multifásicos

La separación, es un proceso físico mediante el cual se logra obtener las diferentes fases de una mezcla multifásica, por ejemplo, separar el gas de una mezcla trifásica agua-aceite-gas, como el caso de flujo de hidrocarburos, para separar precisamente el gas de la mezcla.

En la industria petrolera, existen dispositivos de almacenamiento que sirven como separadores de la mezcla que se obtiene de los pozos y como su nombre lo indica, se utilizan para separar las fases de la mezcla, petróleo-agua-gas.

Estos separadores son un dispositivo mecánico que permite obtener los principales productos de la mezcla trifásica proveniente de los pozos, los cuales son el crudo y el gas, y al mismo tiempo, permite separar el agua que, en el caso del tipo de extracción, se introduce en el pozo. La separación en estos dispositivos se lleva a cabo aprovechando las propiedades físicas de cada fluido y mediante el efecto propio la gravedad. Éstos dispositivos también sirven como tanques de almacenamiento de la mezcla.

2.3.1 Clasificación de separadores multifásicos

Los separadores multifásicos se clasifican, por su geometría y forma en horizontales, verticales y esféricos, por el tipo de separación que realiza en bifásico o trifásico.

A continuación, se describen de acuerdo con su forma y geometría [8]:

1. **Separadores horizontales:** en cuanto a manejar grandes cantidades de fluidos este separador es el más económico. Estos separadores trabajan a 1/3 de su capacidad, lo que hace que el área superficial del fluido (mezcla) sea mayor en comparación de los

otros dos tipos de separadores. Debido a que el área es mucho mayor en comparación con la geometría de otros separadores, permite que las burbujas de gas se separen de la mezcla de una forma más rápida.

2. **Separadores verticales:** Este tipo de separadores pueden manejar mayores cantidades de fluidos que los separadores horizontales. Puede mantener líquidos con alto contenido de arenas y lodos o cualquier otro tipo de material sólido. Tienen un mayor control de nivel. Pero en cambio, son más costosos que los horizontales, ya que se necesitan diámetros mayores para manejar la misma cantidad de gas.
3. **Separadores esféricos:** Se consideran un caso particular de un separador vertical donde la unión entre sus tapas no es de forma cilíndrica, llegan a ser muy eficientes puesto que mantienen una alta presión, pero no son muy utilizados en el ámbito petrolero ya que su fabricación es muy difícil y tienen poca capacidad para la agitación de los líquidos.

En la Figura 2.3 se pueden observar las características principales de cada uno de los separadores mencionados.

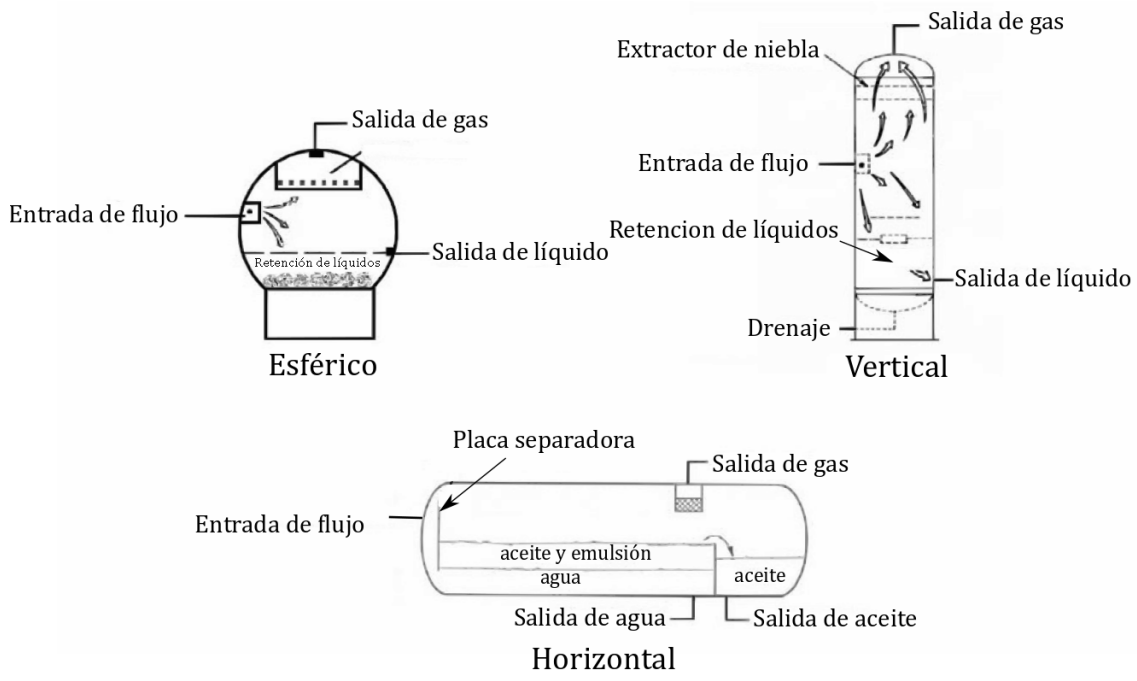

Figura 2.3 Tipos de tanque separadores multifásicos [6].

De acuerdo con el tipo de separación que realiza [8]:

1. **Bifásico:** Realizan la separación entre 2 fases, ya sea líquido-líquido, líquido-gas o gas-solido.
2. **Trifásico:** La separación que se lleva a cabo dentro de estos separadores, ocurre en un fluido de 3 fases: líquido-líquido-gas, como la mezcla de hidrocarburo extraída de un pozo petrolero, que está compuesta por petróleo-agua-gas.

Cualquiera de las 3 formas se considera convencional cuando realizan una separación bifásica.

2.4 Mezclador estático helicoidal

Mezclar sustancias es algo que se hace en algunas ramas de la industria como la farmacéutica o la alimenticia, donde la unión de 2 o más componentes genera un beneficio para los procesos que necesiten realizar. En comparación con estas industrias, las aplicaciones de mezclado en la industria petrolera son limitadas [9].

El diseño de estos mezcladores estáticos puede ser de formas diferentes, siendo el más común el tipo KMS, con elementos de forma helicoidal como se muestra en la Figura 2.4 [9]; algunos son removibles de la tubería y otros están anclados a las paredes de ésta. Generalmente se encuentran en secciones y se colocan usualmente al final de la tubería, que lo hacen removible para que el mantenimiento sea más fácil.

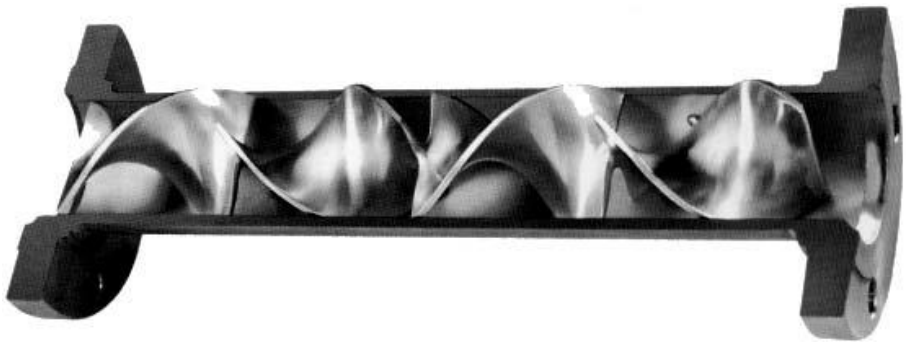

Figura 2.4 Mezclador estático helicoidal KMS [9].

En particular los mezcladores estáticos evitan la necesidad de utilizar piezas móviles, geométricamente están diseñados para dividir los fluidos en múltiples partes que tienen como resultado la generación de una mezcla homogénea. Son los más recomendados para flujos multifásicos donde hay cambio de fase o contienen una fase dispersa como en el caso de flujos multifásicos líquido-líquido, produciendo dispersión en la presencia de gas [10].

En la Figura 2.4 se observa la geometría común que tiene el mezclador estático helicoidal KMS, compuesto por n elementos con las siguientes características: un ángulo de torsión de $\beta = 180°$ y con un ángulo de discontinuidad entre elementos de $\alpha = 90°$ y cada elemento presenta una relación entre su longitud l y diámetro D de $l/\mathrm{D} = 1$ [9].

Como su nombre lo indica, estos dispositivos son empleados principalmente para la generación de mezclas homogéneas de fluidos, siendo una de sus ventajas la capacidad de trabajar de manera continua, siempre que el flujo esté pasando a través de él.

2.5 Propiedades físicas del agua, aceite y aire

Para realizar un excelente análisis de los resultados de la experimentación de este trabajo, es necesario conocer algunas de las propiedades físicas básicas de los fluidos empleados en este experimento los cuales son agua, aceite vegetal de cocina y aire.

2.5.1 Densidad y gravedad especifica

La densidad ρ es definida como la cantidad de masa m por unidad de volumen V, la cual depende de la temperatura y la presión [11].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (kg/m^3) \qquad Ecuación\ 2.1$$

La gravedad específica, también denominada *densidad relativa* está definida como la densidad de una sustancia entre la densidad de una sustancia estándar ρ_{H_2O}, generalmente agua a 4 °C para la cual su densidad es 1000 kg/m^3 [11].

$$GE = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \qquad Ecuación\ 2.2$$

2.5.2 Densidad de los gases ideales

Toda expresión donde se encuentren relacionadas la presión, temperatura y densidad de una sustancia se denomina *ecuación de estado* y la más conocida es la ecuación de estado del gas ideal.

$$PV = RT \quad o \quad P = \rho RT \qquad Ecuación\ 2.3$$

Donde T es la temperatura absoluta, R la constante de los gases, la cual se diferente para cada gas, y se determina a partir de $R = R_u/M$, donde $R_u = 8.314\ KJ/kmol * K$ y M es la masa molecular del gas, es la constante universal de los gases, P la presión absoluta, V el volumen específico. A toda sustancia que obedezca ésta relación se le denomina *gas ideal*. Ciertos gases conocidos como lo son el aire, oxigeno, hidrogeno, helio, nitrógeno, argón, neón y kriptón son considerados prácticamente como gases ideales.

2.5.3 Viscosidad

Se denomina viscosidad a la resistencia que opone un fluido al movimiento o deformación debida a la fuerza de fricción que se desarrolla internamente entre las diferentes capas de los fluidos conforme se ven obligadas a moverse unas contra otras. En los líquidos la viscosidad *disminuye* al incrementar la temperatura opuesto es en los gases donde al existir un incremento de temperatura la viscosidad *aumenta* [11].

La viscosidad para líquidos y gases se representa con las siguientes expresiones:

Líquidos: $$\mu = a10^{b/(T-c)} \qquad Ecuación\ 2.4$$

Gases: $$\mu = \frac{aT^{1/2}}{1+b/T} \qquad Ecuación\ 2.5$$

Donde *a, b y c* son constantes que se pueden determinar de forma experimental [11].

El conocimiento de estas propiedades (de los fluidos empleados) causa que el análisis de los experimentos se presente de una manera más clara, sabiendo que es cada una de ellas. En la Tabla 2.1 se presentan densidades de los tres fluidos, agua, aceite y aire.

Tabla 2.1 Densidades de los fluidos.

Fluido	Densidad [kg/m^3]
agua	998
aceite	871.5
aire	1.2

3 Metodología

A continuación, se describe el planteamiento del proceso mediante el cual se llevó a cabo la experimentación necesaria para el estudio y análisis de la separación de un flujo multifásico de una mezcla de agua/aceite/aire correspondiente a la similitud que tiene con la mezcla existente en la extracción de un pozo petrolero, mediante los sistemas de separación por gravedad y con la implementación de un dispositivo estático helicoidal.

3.1 Propuesta de diseño y mejoramiento de plataforma experimental

El módulo experimental consta de 3 partes fundamentales: depósito de mezcla, bomba y tanque separador, este último considerado como el más importante ya que es donde se lleva a cabo el análisis de la separación de la mezcla multifásica.

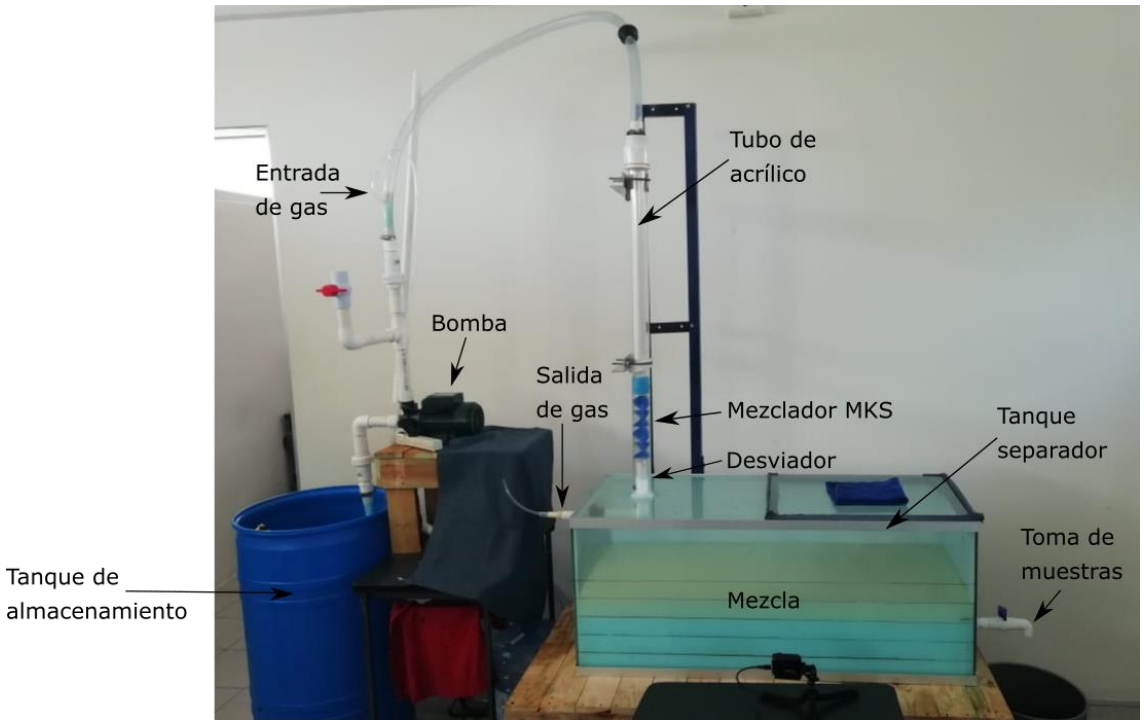

Figura 3.1 Plataforma experimental.

Se observa en la Figura 3.1 que el tanque separador cuenta con una entrada de fluido multifásico y 2 salidas, una para la toma de muestras de la mezcla multifásica y otra para la extracción del gas (aire) previamente separado al pasar por el dispositivo estático helicoidal.

La entrada está constituida por un tubo de acrílico transparente con diámetro interno de 44.8 milímetros, los tubos para la toma de muestras y de salida del gas separado (aire) son de ½ y ¾ de pulgada de diámetro respectivamente, ambos de policloruro de vinilo (PVC).

El tanque de almacenamiento de la mezcla es un tanque de plástico con una capacidad de 120 litros, donde se almacenan al mismo tiempo tanto el agua como el aceite, a una proporción de una cuarta parte de aceite del total de la mezcla, 60 litros de agua y 20 litros de aceite, haciendo un total de 80 litros de mezcla.

La bomba que se utilizó fue una bomba centrifuga marca Oakland de 373 watts (1/2 HP) con un diámetro en la succión y a la descarga de 25.4 milímetros (1 pulgada) y 40 L/min.

En este capítulo se destacan las aportaciones realizadas a la plataforma experimental en su momento ya existente la cual se utilizó para realizar el trabajo “Estudio de eficiencia de separación de fases por gravedad y dispositivo estático helicoidal” [5], donde se estudió la eficiencia de la separación de la mezcla multifásica. Las aportaciones que se realizaron para llevar a cabo este trabajo fueron las siguientes:

a) **Tanque separador**: se remplazó el tanque separador de [5], originalmente de acrílico transparente, por uno de cristal de 6mm de espesor, dicho tanque conserva las dimensiones 100x40x40 cm con una capacidad total de 160 litros, para que se mantuvieran las mismas condiciones bajo las cuales se han realizado los experimentos en [5], el tanque separador anterior mostraba algunos inconvenientes de filtración al contener la mezcla. El tanque actual se muestra en la Figura 3.2.

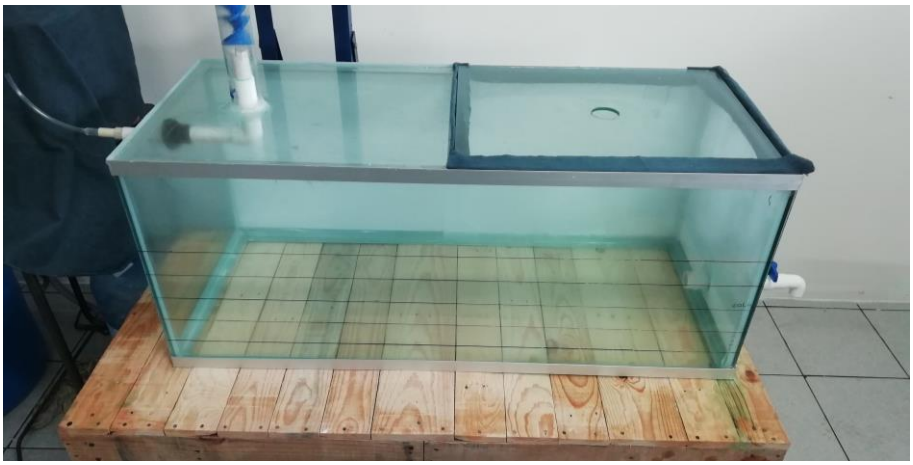

Figura 3.2 Tanque separador.

b) **Toma de muestras**: se agregó una toma de muestras al costado derecho del tanque separador, el cual se encuentra más alejado de la entrada de la mezcla, como se muestra en la Figura 3.3. Consta de una válvula de paso tipo esfera de "PVC" (policloruro de vinilo) de ½ pulgada. El realizar muestreo ayudó al estudio de la velocidad de la separación de la mezcla multifásica y la concentración de aceite presente en cada una de ellas.

Figura 3.3 Válvula para la toma de muestras.

c) **Entrada de gas (aire)**: se incorporó la entrada de la fase gaseosa a la mezcla multifásica, mediante una manguera de 5/32 pulgadas de diámetro insertada en la manguera de descarga de la bomba, aprovechando el efecto de succión que se genera al pasar el fluido por la manguera de descarga con medida de 1 pulgada de diámetro,

como se muestra en la Figura 3.4. Para hacer más fácil su visualización, el aire entra con vapor generado por un vaporizador, sin embargo, se presentó una desventaja en este componente del sistema al no poder medir la cantidad de aire que se agrega a la mezcla.

Figura 3.4 Sistema de entrada de aire (gas) a la mezcla.

d) **Sistema desviador**: se mejoró el sistema desviador de gas (aire), como se observa en la Figura 3.5, manteniendo las condiciones geométricas las cuales son: distancia de 1.2 centímetros a 2.5 centímetros de la salida del mezclador a la entra del dispositivo desviador, para aprovechar el fenómeno, como resultado de la investigación en [4], en éste caso se emplearon 2 centímetros y un diámetro interno de alrededor de 2 cm, por lo que se implementa tubería de policloruro de vinilo (PVC) de ¾ de pulgada; modificando el diámetro de a la salida del tubo, después de la pared del tanque se reduce el diámetro con una manguera transparente para que se pudiera observar la salida del gas (aire) de ¼ de pulgada de diámetro.

Figura 3.5 Sistema desviador de gas.

e) **Premezclado:** antes de iniciar con el experimento y accionar la bomba para generar el flujo multifase, se mezclan los fluidos (agua y aceite) en el tanque de almacenamiento para simular las condiciones reales de la extracción en campo.

3.2 Descripción de prueba experimental

En este trabajo de estudio se utilizó una emulsión de agua y aceite en proporciones 75% y 25% respectivamente y una parte del flujo es aire disperso que entra al flujo por efecto de diferencia de presiones. Esta mezcla pasa a través de un mezclador estático helicoidal tipo KMS, donde la parte menos densa del flujo trifásico que es el gas (aire) es estudiada en el centro de la tubería debido al efecto centrifugo que genera el mezclador y la parte más densa del flujo se analiza en las paredes de la tubería.

El mezclador está constituido por 4 elementos helicoidales con un ángulo de rotación de 180° y dispuestos entre ellos con un ángulo de 90° como se muestra en la Figura 3.6.

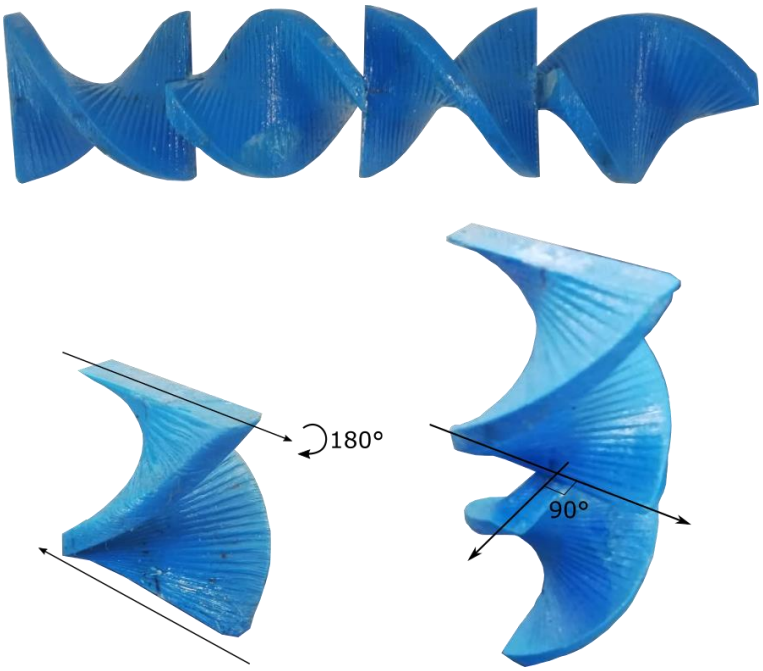

Figura 3.6 Configuración de mezclador estático helicoidal KMS.

A continuación, se describe paso a paso cómo se lleva a cabo cada uno de los experimentos realizados para el estudio y análisis de separación de un flujo multifase; en general los pasos a seguir son prácticamente iguales entre cada bloque de experimentos, la única diferencia en comparación con la dinámica de sólo gravedad es que se incorpora un dispositivo estático helicoidal por el cual pasa el flujo antes de entrar al tanque para verificar la separación del aire (gas) de la mezcla.

A grandes rasgos, el experimento consiste en verter un flujo multifásico agua/aceite/aire en un tanque separador, para analizar la separación de la mezcla, los pasos a seguir para la realización adecuada del experimento son los siguientes:

1. **Premezclado:** es lo primero que se realiza antes de iniciar el proceso experimental, con un agitador accionado por un motor a baterías, se mezclan el agua y el aceite que se encuentran en el tanque de almacenamiento a una proporción del 25 % de aceite (60 litros de agua y 20 litros de aceite) hasta que se tenga una mezcla uniforme. El proceso de mezclado es constante a lo largo del proceso completo en el cual el flujo multifásico alcanza el 50% del tanque separador (80 litros).

2. **Accionamiento de la bomba:** en este paso se acciona la bomba dando inicio al proceso de llenado del tanque separador. Para este momento la entrada de aire a la manguera de descarga de la bomba está cerrada.
3. **Entrada de aire (gas):** después de unos segundos, los suficientes para que se genere el vacío en la maguera de entrada de aire, se abre y comienza a entrar el gas por el efecto que genera el fluido al pasar por la manguera a la salida de la bomba, junto con el vapor generado por el vaporizador, esto específicamente para poder apreciar la trayectoria generada por el aire dentro del flujo multifásico y dentro o a la salida del tanque separador.
4. **Entrada al tanque separador:** el fluido bifásico agua/aceite sale de la bomba previamente mezclado y remezclado al pasar por el impulsor de ésta y, al llegar a la entrada de aire se convierte en un flujo trifásico agua/aceite/aire, que viaja a través de la maguera de descarga de la bomba la cual se une al tubo de acrílico transparente a la entrada del tanque separador, y éste comienza a llenarse hasta que alcanza el 50% de su totalidad, que es igual a 80 litros, para iniciar el proceso de separación.
5. **Toma de muestras:** después de que el tanque llegue a 80 litros se comienzan a tomar las muestras, cada una desfasada de la siguiente por 10 minutos, con un total de 3 muestras, en un vaso de precipitados de 200 mililitros, con el fin de analizar la concentración de aceite en la mezcla a través del tiempo.
6. **Análisis de separación:** esta es una de las partes más importantes de la experimentación al igual que la toma de muestras. Cuando la emulsión entra en reposo y comienza su proceso de separación, pasados alrededor de entre 20 y 30 minutos aparece una capa intermedia de mezcla, dejando el agua debajo y el aceite en la parte superior de ella. Es esta capa la que empieza a analizarse, midiendo su espesor a lo largo del tiempo, cronometrado en intervalos de 10 minutos, estudiando la velocidad de la separación, teniendo en cuenta que cada milímetro medido es equivalente a 400 mililitros de aceite separado de la emulsión. Este proceso de análisis se realiza durante 200 minutos en cada una de las pruebas realizadas en el proceso de separación por gravedad.

El proceso anterior se lleva a cabo para realizar el estudio y análisis de la separación de un flujo multifásico agua/aceite/aire por gravedad. Para el proceso de separación con dispositivo estático helicoidal se realizan los mismos pasos a excepción de que en el segundo caso el flujo multifásico pasa a través de dicho dispositivo.

En el Capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos al realizar las diferentes pruebas experimentales, 3 pruebas para analizar separación por gravedad y 3 pruebas con dispositivo estático helicoidal. En el segundo escenario, se consideran 3 casos diferentes de configuración del dispositivo con respecto a parámetros adimensionales, para obtener mayor cantidad de datos para el estudio de separación de flujo multifase. Teniendo en cuenta que los parámetros para el análisis de separación son la concentración de aceite en las muestras y el espesor de la capa de emulsión.

4 Resultados experimentales

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3, en el cual se presentaron 3 pruebas experimentales para los 4 casos presentados.

En la Figura 4.1 se muestra el dispositivo estático helicoidal utilizado en 2 de los 4 casos analizados y en la Figura 4.2 la posición de éste respecto a la entrada del tanque.

Figura 4.1 Dispositivo estático helicoidal de 4 elementos.

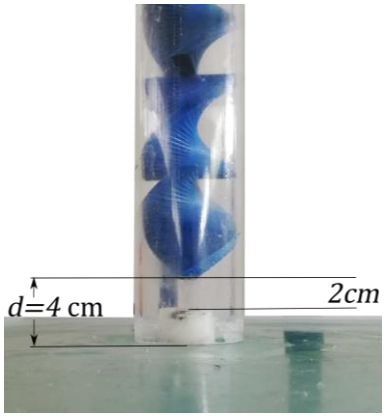

Figura 4.2 Posición del mezclador.

La Tabla 4.1 muestra un resumen de las condiciones de operación de los experimentos en cada uno de los 4 casos analizados.

Tabla 4.1 Condiciones experimentales por caso.

Casos	Gravedad	Mezclador d=4 cm, 4e	Mezclador d=10 cm, 4e	Mezclador d=10 cm, 2e
A	✓	X	X	X
B	✓	✓	X	X
C	✓	X	✓	X
D	✓	X	X	✓

Los 3 experimentos de los 4 casos analizados se realizaron con las siguientes condiciones iniciales:

- Temperatura: 22 °C (temperatura ambiente).
- Agua: 60 Lts.
- Aceite: 20 Lts.
- Aire: indeterminado.

En la Figura 4.3 se observa ya el efecto de la separación en las muestras tomadas al experimento #1 del Caso A, como ejemplo de la visualización de cada muestreo por experimento realizado. Este procedimiento de análisis de muestras se realiza para cada uno de los experimentos; tomando las muestras cada 10 minutos después de que la mezcla entra completamente en el tanque separador,

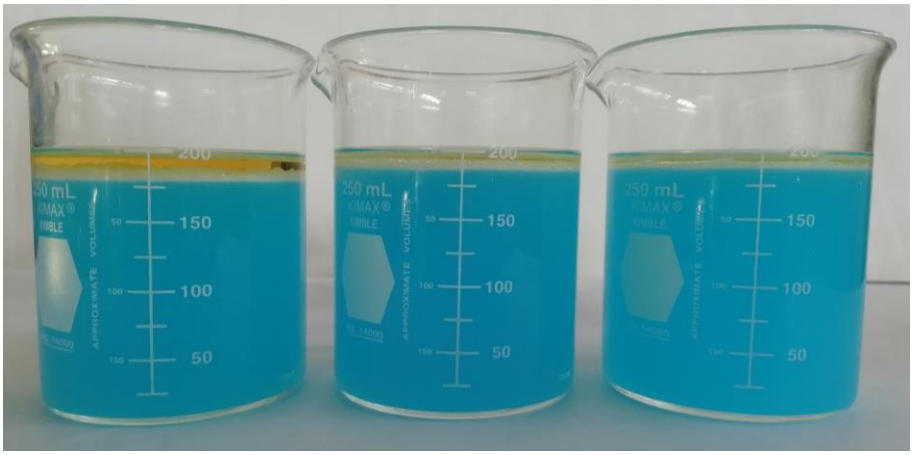

Figura 4.3 Comparación de las tres muestras tomadas a los 10, 20 y 30 minutos después de verter totalmente la mezcla en el tanque, de izquierda a derecha respectivamente. Caso A, experimento #1.

4.1 Separación por gravedad (Caso A)

Se realizó la primera prueba para el análisis de separación por gravedad, Caso A. Siguiendo el proceso para llevar a cabo el experimento mencionado en el Capítulo 3, se obtienen los siguientes resultados.

En las muestras tomadas en el proceso de separación por gravedad con el tanque con el total de la mezcla (80 litros) y con diferencia de 10 minutos entre cada una de las muestras, la diferencia es notoria a simple vista, como se observa en la Figura 4.3.

En la primera muestra tomada a los primeros 10 minutos, se observa que contiene 182 ml de agua, por lo que 18 ml son de aceite que equivalen al 9% del total de la mezcla. En la segunda muestra, tomada a los 20 minutos, el análisis arrojó que para ese momento se tienen 15 ml de aceite, lo que es equivalente al 7.5% del total de la mezcla. La tercera muestra, tomada a los 30 minutos, da como resultado que ya tan solo cuenta con el 4.5% de aceite. Esto se puede observar en la Tabla 4.2.

Esto implica que al transcurrir el tiempo el aceite se separa de la mezcla y por diferencia de densidades sube, por lo que en el momento de tomar las muestras 2 y 3 con ayuda de la válvula de muestreo mencionada en el Capítulo 3, se tiene menor cantidad de aceite en esa posición del tanque (5 centímetros por encima del fondo del tanque).

Para el segundo experimento en la primera muestra tomada a los 10 minutos, se tienen 178 ml de agua, por lo que 22 ml son de aceite que equivalen al 11% del total de la mezcla. En la segunda muestra, el análisis arrojó que para ese momento tenemos 12 ml de aceite, lo que es equivalente al 6% del total de la mezcla. La tercera muestra, la cual fue tomada a los 30 minutos, da como resultado que ya tan solo cuenta con el 4.5% de aceite, se puede observar en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Proporciones de mezcla. Caso A.

Tiempo de muestreo [min]	Concentraciones [%]					
	Experimento #1		Experimento #2		Experimento #3	
	agua	aceite	agua	aceite	agua	aceite
10	91	9	89	11	89.5	10.5
20	92.5	7.5	94	6	92.5	7.5
30	95.5	4.5	95.5	4.5	94	6

Se observa en la Tabla 4.2 que para el experimento #3 la concentración de aceite en las muestras va disminuyendo de 10.5%, 7.5% y 6% en las muestras tomadas en los tiempos correspondientes respectivamente.

Al analizar la separación de la mezcla transcurridos 20 minutos dentro del tanque es posible observar cómo se forma una capa intermedia de mezcla (agua/aceite/aire) la cual tiene aproximadamente 7 cm, lo que es equivalente a 28 litros de mezcla que aún no se separa por completo, como se muestra en la Figura 4.4, donde se aprecia también una pequeña franja superior de aceite aproximadamente un 1 cm de espesor, lo que es equivalente, con respecto a las medidas del tanque a 4000ml (4 Litros) de aceite que ya está separado.

Figura 4.4 Capa de mezcla intermedia de agua/aceite/aire aún por separarse.

A partir de la aparición de la capa intermedia de mezcla se inició la medición de ésta en unidades de centímetros a lo largo de un periodo de 200 minutos, datos que fueron concentrados en la Tabla 4.3, donde se puede observar que gráficamente adquieren la forma de la Figura 4.5.

Tabla 4.3 Comportamiento de separación de mezcla. Caso A.

Minutos x10	Espesor de capa en cm		
	Experimento #1	Experimento #2	Experimento #3
0	7	7.5	7
1	6.5	7	6
2	6	5.5	5
3	5.5	5	5
4	5	4.8	5
5	4.5	4.5	4.8
6	4.5	4.5	4.6
7	4.3	4.5	4.5
8	4	4.3	4.4
9	4	4.2	4.1
10	4	4.1	3.9
11	3.8	3.9	3.8
12	3.5	3.9	3.7
13	3.5	3.8	3.6
14	3	3	3.4
15	3	2.7	3.2
16	3	2.5	3.1
17	2.8	2.4	3
18	2.6	2.1	2.7
19	2.5	2.1	2.6
20	2.3	2	2.5

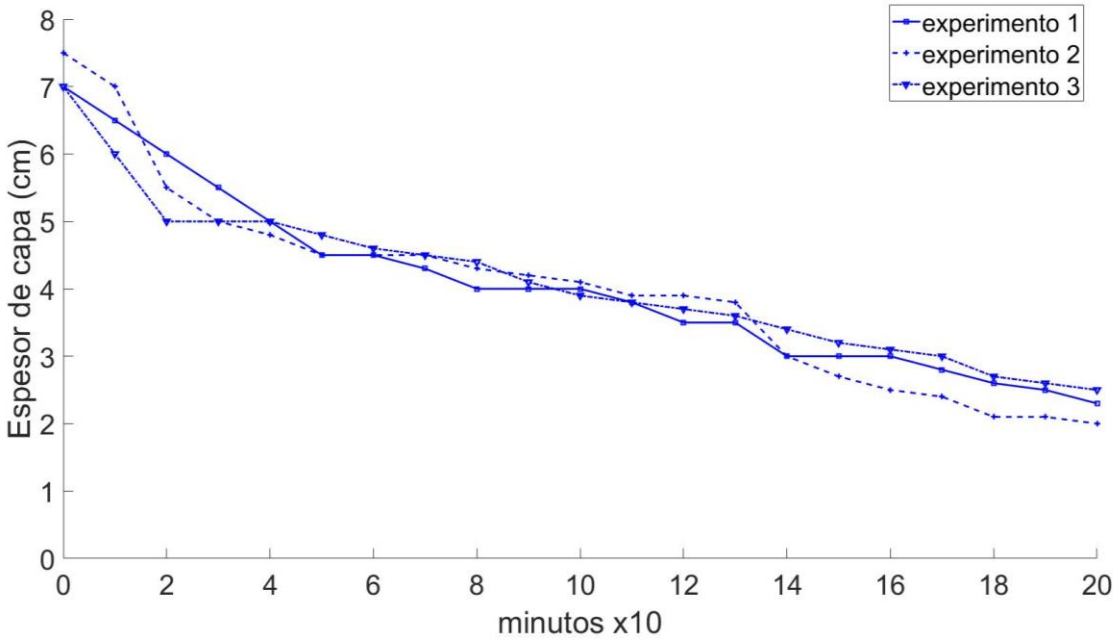

Figura 4.5 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso A.

En la Figura 4.5 se observa que alrededor de los primeros 50 minutos la separación de la mezcla sucede más rápido que en los minutos posteriores, esto sucede gracias a que el gas (aire) que está en la mezcla se separa a una velocidad mayor que el aceite. En la gráfica del Experimento #2 y #3 podemos observar que una considerable separación de aire sucede en los primeros 20 minutos de la medición.

Al comparar las gráficas de cada uno de los experimentos del Caso A es posible apreciar que el comportamiento de la separación en función del tiempo es similar. Iniciando con una velocidad mayor en los primeros 40 minutos, como se muestra en la Figura 4.5.

Una vez comprobado el comportamiento de la separación en el Caso A, se utilizan como ejemplo, los datos del tercer experimento (ya que el comportamiento es el mismo se puede observar con cualquiera de los otros 2 experimentos), sólo para visualizar el efeto de la separación y graficar el comportamiento de la mezcla y cada uno de los fluidos de interés en función del tiempo, a lo largo de 200 minutos, como se observa en la Figura 4.6.

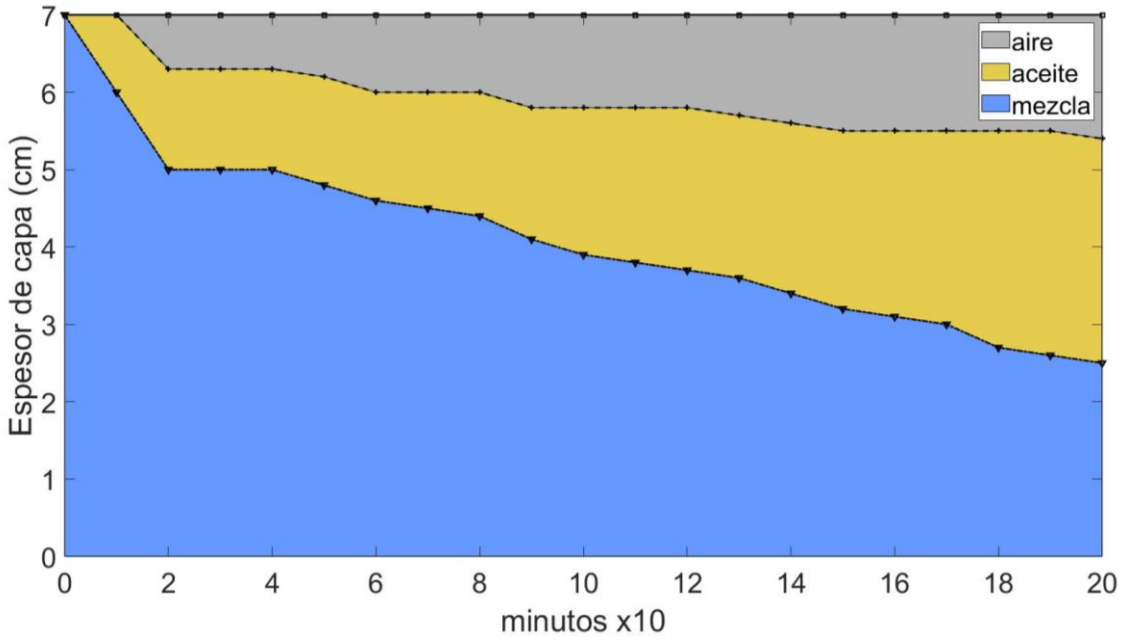

Figura 4.6 Comparación de fluidos en capa intermedia de mezcla en función del tiempo, Caso A, experimento #3.

Visualmente en la Figura 4.6 se observan 3 gráficas, las cuales representan el espesor de la capa intermedia de mezcla y el nivel que cada una de las sustancias que la componen a través del tiempo (200 minutos); donde se observa, el aire, el aceite y la mezcla de manera descendente respectivamente.

De este análisis podemos concluir que partiendo de una mezcla homogénea en $t = 0$ la capa intermedia de mezcla inicia la separación; en los primeros 20 minutos es dónde se separa la mayor cantidad de gas, esto se entiende al observar cómo disminuye la capa intermedia de 7 a 6.3 centímetros en $t = 20$, de los cuales 1.3 centímetros pertenecen al aceite ya separado y 5 centímetros a la mezcla, que son equivalentes a 20 litros aun por separarse. A partir de $t = 40$ minutos la separación prácticamente se vuelve constante, como se observa en la Figura 14. En $t = 200$ minutos, se observa que el espesor de la capa intermedia es de 5.4 centímetros de los cuales 1.6 centímetros es aceite separado y 2.9 centímetros son de mezcla; por lo que se puede decir que del tamaño de partida en $t = 0$ que es de 7 centímetros disminuyó 1.6 centímetros, los cuales estaban ocupados por el aire que era parte de la mezcla; al ser un fluido menos denso que los otros dos que componen la mezcla, al iniciar la separación realiza su recorrido hacia la superficie, lo cual ayuda a la separación de la mezcla empujando al aceite en su camino hacia la superficie, por lo cual la velocidad de separación en los primeros

minutos es mayor, y ésta se vuelve más lenta y constante en los minutos posteriores, cuando la presencia de gas es mínima y solo se están separando el agua y el aceite.

4.2 Separación con dispositivo estático helicoidal (Caso B)

Una vez analizados los resultados de las pruebas de separación por gravedad, la siguiente fase de la experimentación, considera un dispositivo estático helicoidal de 4 elementos como se muestra en la Figura 4.1.

Este dispositivo estático helicoidal se coloca en la tubería, en $d = 4$ centímetros de la entrada del tanque separador, y a 2 centímetros entre la salida del mezclador y la entrada del dispositivo desviador como se puede ver en la Figura 4.2; distancia constante en los cuatro casos, determinada en [4]. Se realizaron 3 experimentos bajo las mismas condiciones como se indica en el Capítulo 3, obteniendo resultados que se utilizaron para el análisis siguiente.

Siguiendo el mismo procedimiento del análisis de las muestras extraídas, en el Experimento #1 la primera muestra tomada a los 10 minutos contiene 161 ml de agua, por lo que 39 ml son de aceite que equivalen al 19.5% del total de la mezcla. En la segunda muestra tomada a los 20 minutos, se observa que para ese momento tenemos 26 ml de aceite en la muestra, lo que es equivalente al 13% del total. La tercera muestra, la cual fue tomada a los 30 minutos da como resultado que ya tan solo se cuenta con el 10% de aceite como se puede ver en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Proporciones de mezcla. Caso B.

Tiempo de muestreo [min]	Concentraciones [%]					
	Experimento #1		Experimento #2		Experimento #3	
	agua	aceite	agua	aceite	agua	aceite
10	80.5	19.5	81	19	79.5	20.5
20	87	13	87	13	83	17
30	90	10	89.5	10.5	87.5	12.5

Para el Experimento #2 la primera muestra contiene 162 ml de agua y 38 ml de aceite que equivalen al 19% del total de la mezcla. La segunda muestra arrojó como resultado el 13% y la tercera muestra el 10.5% como se muestra en la Tabla 4.4. El Experimento #3 como se

observa en la misma tabla dió como resultado concentraciones de aceite en las muestras de 20.5%, 17% y 12.5%. De igual manera que en el Caso A los resultados de las muestras arrojan que la concentración de aceite disminuye con el paso del tiempo.

La capa de mezcla de agua/aceite/aire, transcurridos 30 minutos dentro del tanque tiene aproximadamente 6.5 cm, lo que es equivalente a 26 litros de mezcla que aún no se separa en los primeros 2 experimentos y en el tercer experimento tiene aproximadamente 5.5 cm, lo que es equivalente a 25 litros de mezcla que aún no se separa. A partir de ese momento $t = 0$ se inició la medición de la capa a lo largo de un tiempo de 200 minutos, derivando la información presentada en la Tabla 4.5, la cual adquiere gráficamente la forma de la Figura 4.7.

Tabla 4.5 Comportamiento de separación de mezcla. Caso B.

Minutos x10	Espesor de capa en cm		
	Experimento #1	Experimento #2	Experimento #3
0	6.5	6.5	5.5
1	6	6.5	5.3
2	5.9	6.2	5.3
3	5.8	6	5.3
4	5.6	5.5	5.3
5	5.4	5.2	5.3
6	5.2	5	5.2
7	5.1	5	5
8	4.9	5	4.9
9	4.8	5	4.7
10	4.7	5	4.6
11	4.6	4.9	4.6
12	4.5	4.7	4.5
13	4.4	4.6	4.4
14	4.3	4.4	4.3
15	4.1	4.3	4.2
16	4	4.2	4.1
17	3.9	4.1	4
18	3.7	4	4
19	3.6	3.9	3.9
20	3.5	3.7	3.8

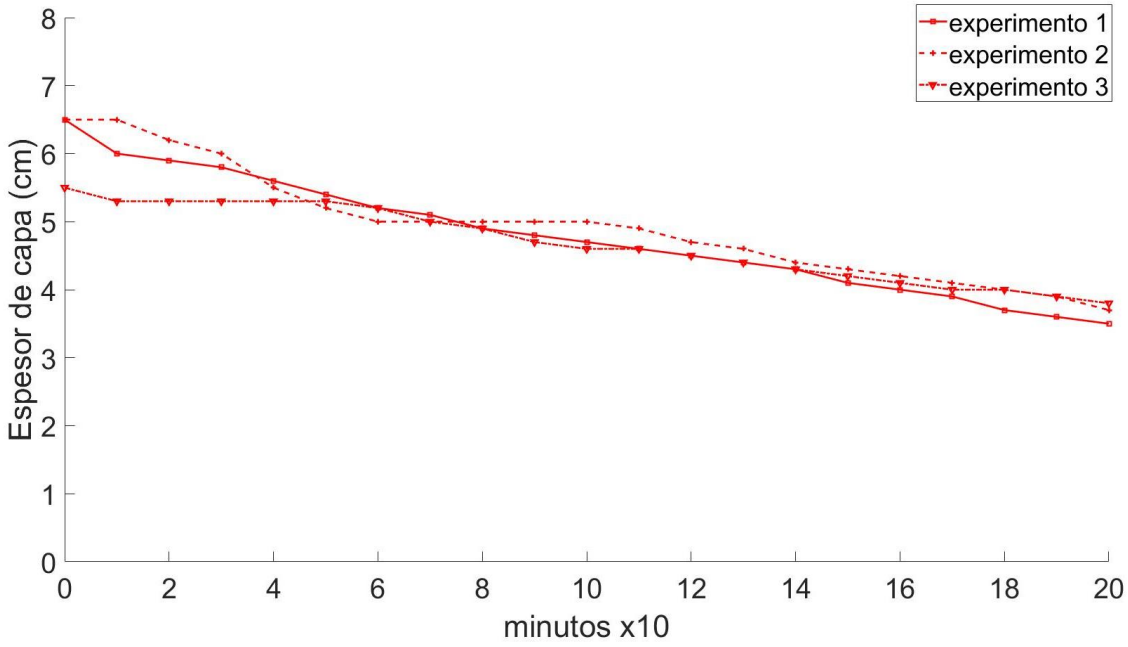

Figura 4.7 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso B.

A diferencia de las pruebas realizadas sin el dispositivo estático helicoidal, el análisis de los resultados de esta prueba muestra que la capa de mezcla es 1 centímetro en promedio más chica, lo que es equivalente a 4 litros menos de mezcla aproximadamente, lo cual se puede decir es el volumen de aire que se logra separar gracias al efeto que se presenta en el fluido al pasar por el mezclador.

En comparación con el Caso A donde el comportamiento muestra que la separación es más rápida en los primeros 50 minutos que es de 2.5 centímetros en promedio, lo que es equivalente a 10 litros de mezcla separada aproximadamente; en este caso es más lenta desde que da inicio la separación, ya que en esos primeros 50 minutos solo se separan 0.8 centímetros.

4.3 Separación con dispositivo estático helicoidal ajustado (Caso C)

Después de analizar los resultados de la experimentación con el dispositivo estático helicoidal con $d = 4$ centímetros, se propone un ajuste en la posición del mezclador, con $d = 10$ centímetros.

El motivo por el que se determinó realizar un ajuste en la posición del mezclador se debió al análisis del comportamiento que toma el fluido al pasar por el mezclador, donde el efecto provoca que los fluidos más densos se posicionen alrededor de la pared de la tubería, quedando el gas en el centro de la misma; este efecto se pierde después de pasar por el mezclador y entrar al tanque en la configuración del Caso B; de ahí que se optó por cambiar la posición del mezclador y en consecuencia el fluido continúe con el efecto por los 10 centímetros que le quedan por recorrer antes de entrar en el tanque separador.

Considerando el ajuste planteado, se realizaron los 3 experimentos de la misma forma que se describe en el Capítulo 3.

Los resultados de las concentraciones de aceite presentes en las muestras de los 3 experimentos realizados se observan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Proporciones de mezcla. Caso C.

Tiempo de muestreo [min]	Concentraciones [%]					
	Experimento #1		Experimento #2		Experimento #3	
	agua	aceite	agua	aceite	agua	aceite
10	79	21	80	20	78.5	21.5
20	85	15	85	15	81	19
30	87.5	12.5	86	14	85	15

La capa de mezcla de agua/aceite/aire, tiene aproximadamente 5.5 cm, lo que es equivalente a 22 litros de mezcla para el Experimento #1, para el Experimento #2 se registran 5.3 cm aproximadamente, lo que corresponde a 21.2 litros y para el Experimento #3 la capa intermedia de mezcla es de 5.7 cm equivalentes a 22.8 litros. A partir de ese momento $t = 30$ minutos de permanecer en el tanque se inició la medición de la capa de mezcla a lo largo de un tiempo de 200 minutos, de lo cual se obtuvieron los datos presentes en la Tabla 4.7, los cuales se comportan gráficamente como se observa en la Figura 4.8.

Tabla 4.7 Comportamiento de separación de mezcla. Caso C.

Minutos x10	Espesor de capa en cm		
	Experimento #1	Experimento #2	Experimento #3
0	5.5	5.3	5.7
1	5.5	5.2	5.5
2	5.5	5.1	5.5
3	5.5	5.1	5.5
4	5.5	5.1	5.3
5	5.5	5	5.3
6	5.5	4.9	5.3
7	5.5	4.9	5.3
8	5.5	4.8	5.2
9	5.4	4.8	5.2
10	5.4	4.7	5.1
11	5.4	4.7	5.1
12	5.4	4.6	5.1
13	5.4	4.5	5.1
14	5.3	4.5	5
15	5.3	4.4	5
16	5.3	4.4	4.9
17	5.3	4.3	4.9
18	5.2	4.2	4.8
19	5.2	4.1	4.7
20	5.2	4.1	4.7

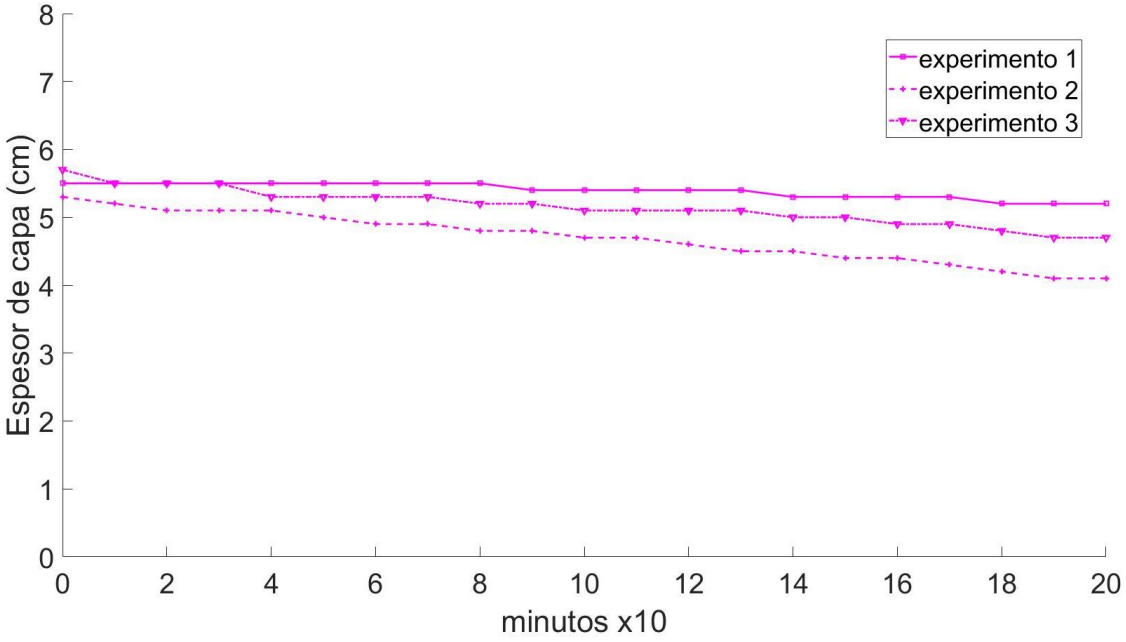

Figura 4.8 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso C.

En este caso el comportamiento es muy diferente a los casos anteriores, es uniforme y casi lineal; se observa que para el mismo tiempo $t = 200$ minutos la disminución de la capa de mezcla es mínima, lo que indica que la separación de fluidos es más lenta, pero también se aprecia que el tamaño inicial de la capa de mezcla es menor en comparación de los 2 casos anteriores, lo que demuestra que hay una disminución de presencia de gas en la mezcla, gas que logra separarse al pasar por el mezclador y salir por el dispositivo desviador, presentado en la Sección 3.1.

Al analizar las gráficas de cada una de las pruebas de la experimentación con el separador estático helicoidal ajustando su posición en $d = 10$ centímetros, es posible apreciar que el comportamiento en función del tiempo de cada una de ellas es muy parecido, sin embargo, depende de las condiciones iniciales del experimento como la cantidad de aire que entra a la mezcla, la cual no es controlada y la uniformidad de la mezcla al entrar al sistema. En comparación con el primer caso donde el comportamiento muestra que la separación es más rápida en los primeros 30 minutos, alrededor de 1 cm cada 10 minutos y en el caso B donde es un poco más lenta de 0.5 cm por cada 10 minutos desde $t = 0$ que da inicio la separación, en éste tercer caso la separación empieza muy lenta de alrededor de 0.1 cm por cada 10 minutos y se mantiene de una forma casi lineal, Como se muestra en la Figura 4.8.

4.4 Separación con dispositivo estático helicoidal ajustado con reducción a 2 elementos (Caso D)

En este caso la experimentación se realizó modificando la configuración inicial del dispositivo estático helicoidal cambiándola de 4 a 2 elementos.

Al ser el dispositivo estático helicoidal un mezclador, su función original es la de mezclar sustancias, y este experimento no es la excepción, por lo que al lograr separar la parte gaseosa de la mezcla (aire) antes de entrar al tanque como se demuestra con el arreglo del Caso C, el mezclador hace su función mezclando aún más las 2 sustancias que siguen en el flujo multifásico lo que afecta la velocidad de separación de la mezcla, la cual disminuye, como se aprecia en la Tabla 4.8, donde la disminución del espesor con el tiempo es diferente en cada caso.

Tabla 4.8 Espesor promedio de capa intermedia de mezcla.

Tiempo [min]	Espesor promedio de capa [cm]			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
t=0	7	6.2	5.5	5.3
t=100	4	4.8	5.1	4.6
t=200	2.3	3.7	4.7	4.2

Como en todos los casos y experimentos realizados los resultados de las concentraciones de aceite en las muestras tomadas se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Proporciones de mezcla. Caso D.

Tiempo de muestreo [min]	Concentraciones [%]					
	Experimento #1		Experimento #2		Experimento #3	
	agua	aceite	agua	aceite	agua	aceite
10	79	21	77.5	22.5	78.5	21.5
20	83.5	16.5	84.5	15.5	81	19
30	86.5	13.5	85.5	14.5	85	15

La capa de mezcla de agua/aceite/aire, en este caso en los Experimentos #1, #2, y #3 comienza con 5.2 cm, 5.6 cm y 5 cm respectivamente. A partir de $t = 30$ minutos de residencia de la mezcla en el tanque de separación se inició la medición de la capa intermedia de mezcla durante un tiempo de 200 minutos, de lo cual se obtuvo la Tabla 4.10 mostrada gráficamente en la Figura 4.9.

Tabla 4.10 Comportamiento de separación de mezcla. Caso D.

Minutos x10	Espesor de capa en cm		
	Experimento #1	Experimento #2	Experimento #3
0	5.2	5.6	5
1	5.1	5.1	4.8
2	5.1	5.1	4.8
3	5	5	4.7
4	5	5	4.7
5	5	4.9	4.7
6	4.9	4.8	4.6
7	4.9	4.8	4.6
8	4.8	4.7	4.6
9	4.8	4.7	4.6
10	4.7	4.6	4.5
11	4.7	4.5	4.5
12	4.6	4.5	4.5
13	4.6	4.5	4.3
14	4.5	4.5	4.3
15	4.5	4.4	4.2
16	4.5	4.4	4.2
17	4.4	4.4	4.2
18	4.4	4.4	4.2
19	4.3	4.3	4.1
20	4.2	4.3	4.1

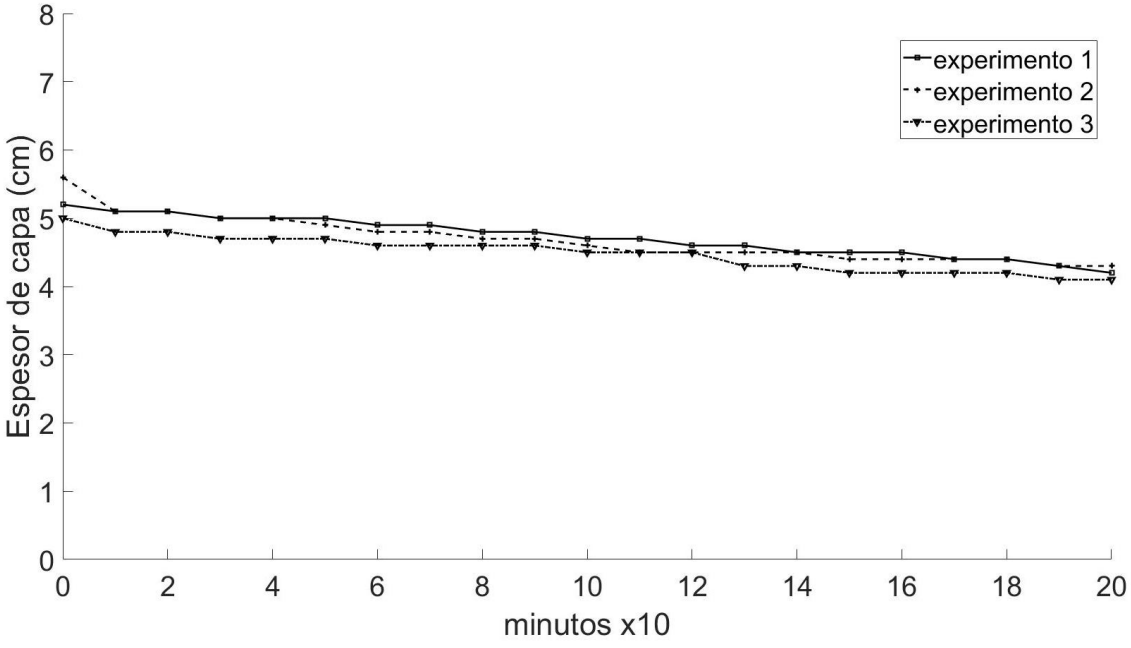

Figura 4.9 Comportamiento de la separación de la capa intermedia de mezcla. Caso D.

Para este caso de igual manera se comprueba que el comportamiento de la separación de la mezcla a través de tres experimentos es similar entre ellas, y para este caso en particular donde se usan dos elementos del mezclador, a lo largo de 200 minutos fue más lenta que en las pruebas de los otros 3 casos, como se puede observar en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Fracción de volumen promedio de los Casos A, B, C y D.

Caso	Fracción de volumen [Lt] en t=100 min			Fracción de volumen [Lt] en t=200 min		
	agua*	aceite	gas	agua*	aceite	gas
A	16	6.8	6.4	9.2	11.2	8.8
B	19.2	4.4	2.8	14.8	7.6	4
C	20.4	2	0.4	18.8	3.6	1.6
D	18.4	2.8	0	16.8	4.4	0

* mezcla con agua como componente dominante

4.5 Eficiencia de la separación

En este experimento la eficiencia η de la separación se define como el cociente de la cantidad de gas que se separó de la mezcla en $t = x$ tiempo, respecto a la presencia nula de gas en la mezcla.

$$\eta_{separación} = 1 - \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1}\right) \qquad Ecuación\ 4.1$$

Donde V_1 y V_2 son el volumen inicial y final respectivamente de la capa intermedia de mezcla.

Empleando la Ecuación 4.1 se calculan las eficiencias de los cuatro casos presentados, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Eficiencias de separación de gas en los Casos A, B, C y D.

Caso	Eficiencia de separación
A	70%
B	89%
C	92%
D	100%

5 Resultados y conclusiones

El análisis de la información obtenida gracias a la experimentación realizada para el estudio de la separación de un flujo multifase, empleando la utilización de un mezclador estático helicoidal como método separador, mostró resultados favorables, después de una serie de experimentos y ajustes en la configuración del dispositivo estático helicoidal. Se ha verificado que bajo determinadas condiciones establecidas en los Casos analizados, es posible aislar la fase gaseosa antes de ingresar al tanque separador.

Primero, el mejorar la plataforma experimental sustituyendo el tanque separador de acrílico por uno de cristal fue una mejora acertada, ya que la calidad del material no solo eliminó el problema de filtración, sino que también fue de mucha ayuda para la observación y el análisis de la separación de la mezcla.

Adicionar una entrada de gas (aire) a la mezcla, pese a que no podía medirse la cantidad exacta que ingresaba, ayudó a observar el comportamiento que éste tiene al interactuar con los otros dos fluidos y finalmente el contar con una toma de muestras para obtener datos más reales de la concentración de elementos presentes en la mezcla fue también de gran utilidad.

La metodología utilizada facilitó realizar las pruebas experimentales, no obstante, es posible mejorarla para que sea aún más sencilla, como añadir una segunda bomba para vaciar la mezcla del tanque separador y llevarla de nuevo al tanque de almacenamiento y también automatizar el mezclado de los fluidos.

Por la configuración geométrica del mezclador, el comportamiento del fluido multifásico formado por agua, aceite y aire fue el esperado, como un movimiento en espiral durante su paso a través del mezclador y la tubería cuando el ajuste lo permitía. Esto confirma y demuestra con éxito una parte de la hipótesis planteada, que es, que se puede separar la parte gaseosa de la mezcla, siendo expulsada a través del dispositivo desviador incorporado a la tubería, antes de que entre al tanque separador, como se muestra en la Figura 18.

Figura 5.1 Gas expulsado del tanque separador, previamente separado al pasar por el mezclador estático helicoidal.

De los 4 casos estudiados en este trabajo, de acuerdo al análisis realizado y la observación llevada a cabo a las pruebas experimentales, se concluye que la mejor opción para la separación de la parte gaseosa de la mezcla es el Caso D: separación con dispositivo estático helicoidal ajustado a 2 elementos, pues los resultados demuestran que además de realizar la separación del gas como en el Caso C, se concluye que al reducir la cantidad de elementos que intervienen, se reducen costos y tiempos de fabricación, sin mencionar que al pasar la mezcla por una menor cantidad de elementos se evita que los dos fluidos restantes continúen mezclándose.

Por otro lado, el análisis del comportamiento de la separación de la mezcla a lo largo de 200 minutos, dio como resultado que contrariamente a lo planteado en la hipótesis, el extraer la parte gaseosa de la mezcla no ayuda a la separación de los fluidos restantes (agua y aceite), como se observa en la Figura 5.2, puesto que la presencia del gas en la mezcla dentro del tanque interviene en el proceso de separación empujando a las partículas de aceite al intentar subir dentro de la mezcla gracias a su baja densidad, al separarlo antes de entrar al tanque tuvo como consecuencia al no haber presencia de gas en la mezcla, que el aceite tomara más tiempo en subir y separarse.

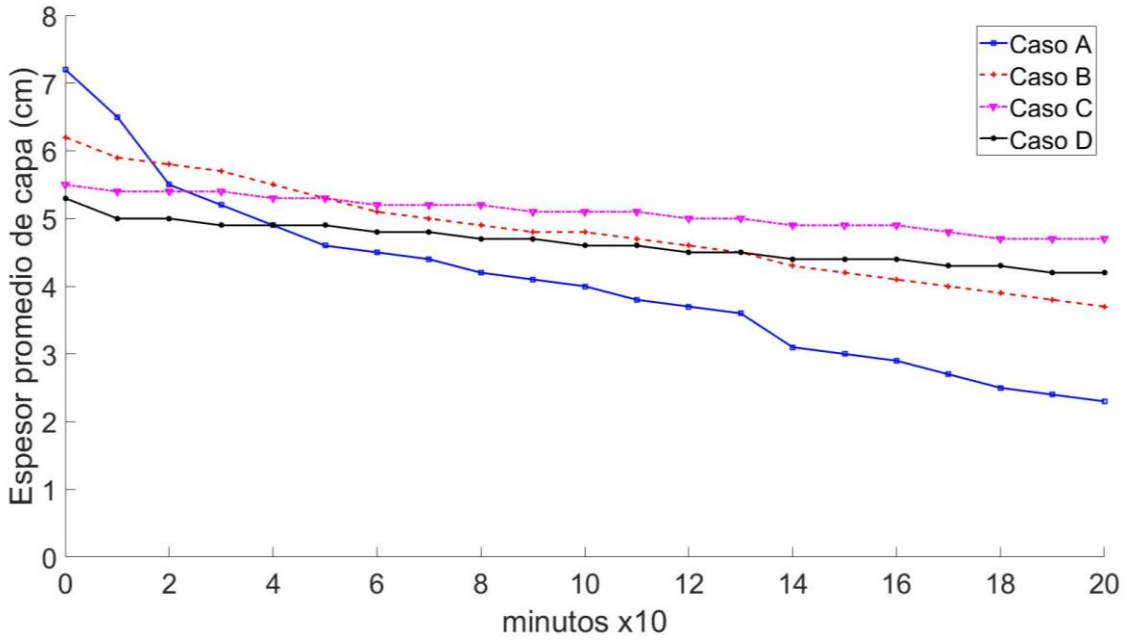

Figura 5.2 Comportamiento promedio de la separación de la capa intermedia de mezcla en los Casos A, B, C y D.

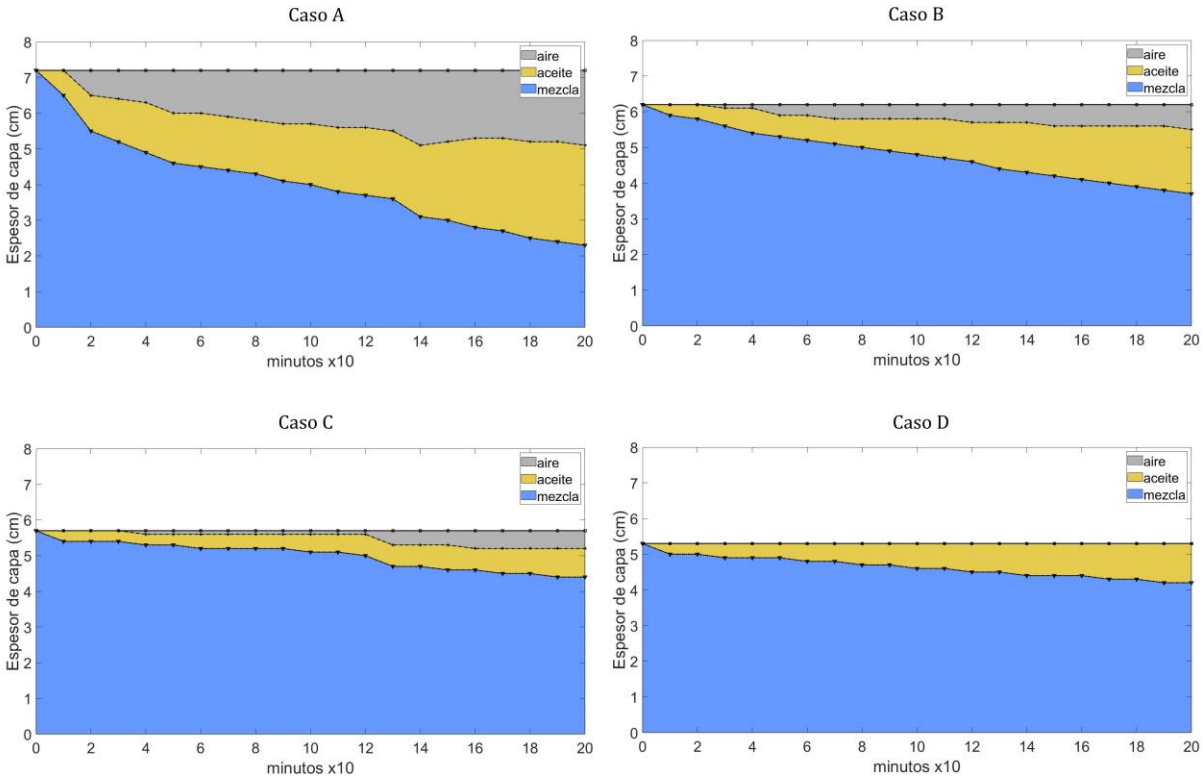

Figura 5.3 Comparación de separación promedio de fluidos en capa intermedia de mezcla en función del tiempo en los Casos A, B, C y D respectivamente.

En la Figura 5.3 se observa el comportamiento de los fluidos en la separación dentro de la capa intermedia de mezcla a lo largo de 200 minutos. En el Caso A existe mayor cantidad de gas (aire) en la capa intermedia de mezcla, esto se concluye al observar la gráfica de mencionado caso; esto se puede ver en $t = 200$ minutos, donde se tienen aproximadamente 2 centímetros de aire, lo que es equivalente a 8 litros de aire aproximadamente, en comparación con los Casos B y C, donde solo hay alrededor de 1 y 0.5 centímetros de gas respectivamente y en el Caso D no se observa presencia de gas, puesto que éste salió por completo antes de caer al tanque, gracias al dispositivo estático helicoidal con 2 elementos y ajustado a 10 centímetros antes de entrar al tanque y al dispositivo desviador, por el cual el gas sale del tanque, como se puede ver en la Figura 5.1.

Teniendo esta información en cuenta y el cálculo de la eficiencia de la separación del gas en la mezcla, se concluye que el mejor caso es el Caso D, ya que es el que cuanta con una eficiencia del 100%, lo cual indica que existía, nula o casi nula presencia de gas disperso en la mezcla.

Aunque la separación del agua y el aceite en el tanque separador utilice mayor tiempo en el caso experimental, para las condiciones reales en planta ese tiempo no es considerable, puesto que en el proceso real se comienza a extraer agua y aceite del tanque hasta que éste se haya llenado, y el tiempo que tarde en hacerlo es suficiente para que se lleve a cabo una eficiente separación. Sin embargo, esta situación debe valorarse para una implementación práctica. Lo que sin duda es una ventaja, es que la ausencia de gas en la mezcla aumenta la eficiencia de la bomba de inyección del fluido motriz en el sistema de levantamiento artificial (SLA) hidráulico, mismo que se extrae del mismo tanque en la aplicación real.

6 Referencias

[1] F. M. White, Fluid Mechanics, New York: McGraw-Hill, 2011.

[2] R. P. Vélez, J. Vásques-Santacruz, L. Marín-Urías, A. Vargas, P. Gracía-Ramírez, J. Morales-de-la-Mora, A. Vite-Morales y E. Gutierrez-Domínguez, «Efficiency Maximization of Jet Pump for an Hydraulic Artificial Lift System,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería,* vol. 35, nº 1, 2019.

[3] D. Melo, *Análisis de estrategia para la separación y caracterización de flujos multifase,* Boca del Río, 2018.

[4] M. Salinas, *Validación de un mezclador estático helicodal como estrategia de separación y caracterización de flujos multifásicos,* Boca del Río, 2019.

[5] J. Rodríguez, *Estudio de eficiencia de separación de fases por gravedad y dispositivo estático helicoidal.*

[6] C. Brennen, *Fundamentals of Multiphase Flows.,* Pasadena, California: Cambridge University Press., 2005.

[7] G. Takas, «A Review of Production Engineering Fundamentals,» de *Sucker-Rod Pumping Handbook*, 2015, pp. 33-345.

[8] C. Escamilla, *Modelacion física de un separador agua-aceite,* D.F. México : Instituto Politécnico Nacional.

[9] E. Paul, V. Atiemo-Obeng y S. Kresta, Handbook of industrial mixing. Since and practice., Wiley-interscience, 2004.

[10] E. Orellana, *Cálculo computacional de la dinámica de fluidos de un mezclador a través del software "FLUENT".*, Concepción, Chile: Universidad del Bio-Bio, 2006.

[11] Y. A. Cengel y J. M. Cimbala, Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones, México: Mc Graw-Hill, 2006.