

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EFECTO DE LAS FUERZAS INERCIALES SOBRE LA VELOCIDAD TERMINAL DE PARTICULAS DE ACEITE EN UNA CORRIENTE DE AGUA EN RÉGIMEN LAMINAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: INGENIERA QUÍMICA PRESENTA: KAREN ALEJANDRA ALVAREZ GAYOSSO



MÉXICO, D. F.

2009

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE PROF.FRANCISCO JAVIER GARFIAS VASQUEZVocal Prof.EDUARDO VIVALDO LIMASecretario Prof.HECTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ1er. Suplente. Prof.AIDA GUTIERREZ ALEJANDRE2do. Suplente Prof.EDTSON EMILIO HERRERA VALENCIA

Esta tesis de licenciatura se realizo en el departamento de Ingeniería Química Metalúrgica, en el conjunto D de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Asesor del Tema:

M. EN C. HÉCTOR JAVIER VERGARA HERNÁNDEZ

SUPERVISOR TÉCNICO:

ING. OCTAVIO VÁSQUEZ GÓMEZ

SUSTENTANTE:

KAREN ALEJANDRA ÁLVAREZ GAYOSSO

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco el apoyo incondiconal que el M. en C. Héctor Javier Vergara Hernández me brindó. Así como tambien su amistad, confianza, ayuda y paciencia en todo momento.

A LOS MIEMBROS DEL JURADO, GRACIAS POR SUS OPINIONES Y CONTRIBUCIONES PARA LA PRESENTACIÓN DE ESTA TÉSIS.

A LA UNAM POR HABER SIDO MI CASA DE ESTUDIO, MI SEGUNDO HOGAR, POR ABRIRME SUS PUERTAS Y DARME LA OPORTUNIDAD DE PREPARARME FISICA, MENTAL, ESPIRITUAL Y PROFESIONALMENTE. GRACIAS POR FORTALECER MIS VALORES, Y ENEÑARME NUEVOS, POR REFORZAR MI CARÁCTER PARA ENFRENTARME A LA VIDA REAL FUERA DEL SALON DE CLASES.

A MIS PADRES Y MI HERMANO DE QUIENES ME SIENTO ORGULLOSA. GRACIAS POR BRINDARME TODO SU AMOR, PACIENCIA, Y APOYO EN TODOS LOS SENTIDOS, POR ESTAR A MI LADO EN CADA MOMENTO Y SER UN GRAN EJEMPLO DE VIDA. PORQUE SIN USTEDES ESTE LOGRO NO HUBIERA SIDO POSIBLE.

A mis tíos Mónica y Héctor Álvarez por su apoyo en toda mi formación tanto personal como académica.

A mi novio Marcos por su motivación, apoyo incondicional, y cariño.

A MIS AMIGOS LUIS, RAFAEL, Y ANTONIO, QUIENES HICIERON DE MI ESTANCIA DENTRO Y FUERA DE LA FACULTAD LA MEJOR ETAPA DE MI VIDA.

DEDICATORIAS.

A *MI MAMÁ:* POR EL GRAN AMOR QUE LE TENGO, GRACIAS POR CUIDARME, Y PREOCUPARTE POR MI BIENESTAR EN CADA ISNTANTE DE MI VIDA. TU APOYO Y AMOR INCONDICIONAL ME HAN IMPULSADO A SALIR ADELANTE SIEMPRE.

A MI PAPÁ: POR BRINDARME TODO SU AMOR, SUS CONSEJOS Y POR HACERME UNA MUJER DE BIEN, E INCULCARME PRINCIPIOS Y CARÁCTER. ASÍ COMO TAMBIEN POR EL INMENSO AMOR Y RESPETO QUE LE TENGO.

A MI HERMANO EDER: POR SER MI AMIGO, CUIDARME Y APOYARME SIEMPRE.

A *mi novio Marcos: Por su cariño, amistad, y respeto, así como su motivación para concluir esta tesis. Y a quien admiro por su gran fuerza para salir siempre adelante.*

A MI AMIGO LUIS: POR ESTAR CONMIGO EN LOS BUENOS Y MALOS MOMENTOS, POR SER UN APOYO INCONDICIONAL DENTRO Y FUERA DE LA UNIVERSIDAD, ÁSÍ COMO POR SU GRAN AMISTAD, LEALTAD Y SINCERIDAD.

INDICE GENERAL

CAPITULO 1
INTRODUCCIÓN1
CAPITULO 2
OBJETIVOS GENERALES Y PARTICUALRES
2.1 Objetivo general
2.2 Objetivos particular
CAPITULO 3
MARCO DE REFERENCIA TEÓRICO4
3.1 Problemática4
3.2 Formación del petróleo4
3.3 Operaciones de Producción5
3.3.1 Producción primaria5
3.3.2 Producción secundaria (Inyección de agua)6
3.3.3 Producción terciaria o Recuperación Asistida7
3.4 Deshidratado y desalado de crudo
3.5 Separadores de Fases10
3.5.1 Separadores de Fases Horizontales11
3.5.2 Separadores de Fases Verticales11
3.6 Mecánica de Fluidos12
3.7 Ley de Stokes12
3.8 Conceptos básicos13
3.9 Balance de fuerzas para una esfera inmersa en un fluido16
3.10 Ecuaciones de diseño para un separador17
3.11 CFD como herramienta para el análisis de mecánica de fluidos19

3.11.1 Modelos Matemáticos	20
3.11.2 Condiciones de Frontera	21
3.11.3 Métodos de discretización y técnicas de solución	21
3.11.4 Método de Volumen Finito (FVM)	22
3.11.5 Método de Diferencias Finitas (FDM)	22
3.11.6 Método de Elemento Finito (FEM)	22

CAPITULO 4

METODOLOGIA DE SIMULACIÓN	23
---------------------------	----

CAPITULO 5

RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	26
-------------------------------------	----

5.2 Relación entre la velocidad horizontal	v la velocidad terminal

5.3 Análisis de la Relación $V_{h/t}$ = 13	en el diseño de separadores horizontales
de agua- petróleo	

CAPITULO 6

CONCLUSIÓNES

CAPITULO 7

BIBLIOGRAFÍA	38
INDICE DE FIGURAS	40
INDICE DE TABLAS	41
APENDICE	42

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

El mayor producto de desperdicio en la producción de petróleo y gas, durante la vida de casi todos los pozos y yacimientos es el agua [1]. La producción de agua, históricamente, ha promediado 6 veces la producción de petróleo durante la vida de todos los pozos petroleros.

La separación agua-aceite es un proceso muy importante en la etapa de demulsificación. El objetivo de un programa de demulsificacion es remover el agua de la emulsión crudo-agua al ingreso de la planta de tratamiento de crudo (PTC) para evitar el manejo de grandes volúmenes de agua.

Una emulsión es un sistema heterogéneo (dos fases, dos componentes), de dos líquidos no miscibles, o de líquidos que no se mezclan bajo condiciones normales. Uno de los líquidos se extiende o esparce a través del otro en forma de gotitas pequeñas. Estas gotitas pueden ser de todos tamaños, desde medianamente grandes hasta muy pequeñas.

La separación de fases bifásicas no miscibles (agua-crudo) se realiza mediante separadores de tipo horizontal o vertical. Para el diseño y selección de estos equipos la relación de velocidad terminal de la fase dispersa con la velocidad horizontal de la fase continua, constituye un parámetro importante. [2]

En este trabajo se pretende analizar por medio de un programa de cómputo de dinámica de fluidos que es CFD (Computacional Fluid Dynamics, por sus siglas en Inglés) la relación cualitativa entre fuerzas de arrastre y de flotación que actúan en el proceso de separación agua-aceite, donde el agua se considerará la fase continua y el aceite la fase dispersa.

Para llevar a cabo este trabajo se consideró un canal por el cual circula agua con régimen de flujo laminar. En la frontera de entrada del sistema, cerca de la base del canal se inyectarán partículas de aceite de un diámetro específico. Se analizarán diversos casos variando las velocidades de la corriente y el diámetro de la fase dispersa para determinar su velocidad de ascenso.

La velocidad terminal de una partícula de aceite en una corriente de agua puede ser calculada teóricamente. Por la ecuación de Stokes. El comportamiento hidrodinámico obtenido a través de la herramienta computacional fue validado comparando las velocidades terminales obtenidas en la simulación con los resultados teóricos de la ecuación de Stokes.

La velocidad terminal de la fase discontinua mostró un error menor al 1 % entre los valores teóricos calculados y los simulados, utilizando una malla de 240,000 celdas. En términos de tiempo de computo, los mejores rendimientos se lograron con la malla de 60000 nodos (3% de error entre datos teóricos y simulados).

Cuando la velocidad de la fase continua guarda una proporción igual a uno, respecto a la velocidad de ascenso o terminal de la fase discontinua, se puede observar una fuerte deformación de los campos de velocidad en el canal. Las fuerzas boyantes provocadas por el ascenso de las gotas de aceite, producen una fuerte deformación en la magnitud y en la dirección de los vectores de velocidad.

Cuando la relación matemática, velocidad horizontal a la que entra el agua al canal entre velocidad terminal de las gotas de aceite es igual 15, las fuerzas inerciales correspondientes a la fase continua alcanzan un valor tal que los efectos de deformación del campo vectorial que pudieran producir las fuerzas boyantes de la fase discontinua se minimizan. Por lo anterior, la estela de gotas de aceite es arrastrada evitando, o en su mejor caso retrasando, de manera dramática (y económicamente poco sustentable), la separación de la fase dispersa.

La misma tendencia se observa para las partículas de 50, 100 y 200 micrómetros. De este trabajo se establece que para lograr una separación gravimétrica eficiente de sistemas bifásicos no miscibles (agua-aceite), la velocidad horizontal máxima a la cual debe fluir la fase continua debe ser menor a 13 veces la velocidad terminal calculada para el diámetro de gota de aceite que se desea separar.

CAPÍTULO 2

2.1 OBJETIVO GENERAL

 Estudiar la relación entre fuerzas de arrastre y de flotación que actúan en el proceso de separación (agua-aceite), donde el agua se considerará la fase continua y el aceite la fase dispersa.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Diseñar un sistema que pueda ser resuelto vía CFD con un máximo rendimiento (tiempo de cómputo mínimo).
- Verificar los modelos multifásicos incluidos en el programa CFD para determinar cuantitativamente el balance entre la fuerza de flotación de partículas de diámetro definido y la fuerza de arrastre de la fase continua.
- Aplicar las ecuaciones de diseño reportadas en la literatura para el dimensionamiento de un separador horizontal.

CAPÍTULO 3

MARCO DE REFERENCIA TEÓRICO

3.1 Problemática

En nuestros días, la demanda de energía mundial es abastecida por la energía originada en el petróleo. A pesar de que existe una gran cantidad de esfuerzo y dinero dedicado a la investigación para la utilización de fuentes energías renovables (solar, eólica, biomasa, entre otras), éstas aun no son competitivas a gran escala. El consumo de petróleo creció de 3,2 billones de m³ en 1975 a 4,4 billones de m³ en el 2000 y se espera que sea de 5,2 billones de m³ en el 2010 [3]. Esto se debe principalmente al acceso actual a áreas de reservas probables y al avance de la tecnología que permiten producir reservas que previamente eran no redituables. Por lo tanto, no solo se realizan esfuerzos para descubrir nuevas reservas, sino para desarrollar nuevas tecnologías que permitan hacer más eficiente la recuperación de petróleo.

La producción de petróleo viene asociada con fluidos no deseados. En la actualidad la industria petrolera produce más agua que petróleo. El agua debe ser separada del petróleo y tratada para ser inyectada o arrojada al medio ambiente.

El agua es el principal producto residual de la industria del petróleo y gas durante la vida de casi todos los pozos individuales y campos de petróleo y gas. Cada día deben manipularse millones de barriles de agua conteniendo grandes cantidades de sales disueltas, sólidos en suspensión, metales pesados e hidrocarburos dispersos y disueltos.

Existe una variedad de métodos para el procesamiento y eliminación de agua residual, la mayoría de los cuales han sido aplicados en un momento u otro encontrándose aún en uso en varios lugares del mundo.

3.2 Formación del petróleo

Es un líquido oleoso bituminoso de origen natural compuesto por diferentes sustancias orgánicas. Se encuentra en grandes cantidades bajo la superficie terrestre y se emplea como combustible y materia prima para la industria química. El petróleo y sus derivados se emplean para fabricar medicinas, fertilizantes, productos alimenticios, objetos de plástico, materiales de construcción, pinturas o textiles y para generar electricidad.

El petróleo se forma bajo la superficie terrestre por la descomposición de organismos marinos. Los restos de animales minúsculos que viven en el mar se mezclan con las arenas y limos que caen al fondo en las cuencas marinas tranquilas. Estos depósitos, ricos en materiales orgánicos, se convierten en rocas generadoras de crudo. El proceso comenzó hace muchos millones de años, cuando surgieron los organismos vivos en grandes cantidades, y continúa hasta el presente. Los sedimentos se van haciendo más espesos y se hunden en el suelo

marino bajo su propio peso. A medida que van acumulándose depósitos adicionales, la presión sobre los situados más abajo se multiplica por varios miles, y la temperatura aumenta en varios cientos de grados. El cieno y la arena se endurecen y se convierten en esquistos y arenisca; los carbonatos precipitados y los restos de caparazones se convierten en caliza, y los tejidos blandos de los organismos muertos se transforman en petróleo y gas natural [4].

Una vez formado el petróleo, éste fluye hacia arriba a través de la corteza terrestre porque su densidad es menor que la de las salmueras que saturan los intersticios de los esquistos, arenas y rocas de carbonato que constituyen dicha corteza. El petróleo y el gas natural ascienden a través de los poros microscópicos de los sedimentos situados por encima. Con frecuencia acaban encontrando un esquisto impermeable o una capa de roca densa: el petróleo queda atrapado, formando un depósito. Sin embargo, una parte significativa del petróleo no se topa con rocas impermeables sino que brota en la superficie terrestre o en el fondo del océano. Entre los depósitos superficiales también figuran los lagos bituminosos y las filtraciones de gas natural.

3.3 Operaciones de Producción

3.3.1. Producción primaria

La etapa inicial consiste en la utilización de la energía propia del yacimiento para la extracción (expansión de las componentes volátiles) o el bombeo mecánico.

La mayoría de los pozos petroleros se perforan con el método rotatorio. En este tipo de perforación rotatoria, una torre sostiene la cadena de perforación, formada por una serie de tubos acoplados. La cadena se hace girar uniéndola al banco giratorio situado en el suelo de la torre. La broca de perforación situada al final de la cadena suele estar formada por tres ruedas cónicas con dientes de acero endurecido. La roca se lleva a la superficie por un sistema continuo de fluido circulante impulsado por una bomba.

El crudo atrapado en un yacimiento se encuentra bajo presión; si no estuviera atrapado por rocas impermeables habría seguido ascendiendo debido a su flotabilidad hasta brotar en la superficie terrestre. Por ello, cuando se perfora un pozo que llega hasta una acumulación de petróleo a presión, el petróleo se expande hacia la zona de baja presión creada por el pozo en comunicación con la superficie terrestre. Sin embargo, a medida que el pozo se llena de líquido aparece una presión contraria sobre el depósito, y pronto se detendría el flujo de líquido adicional hacia el pozo si no se dieran otras circunstancias. La mayoría de los petróleos contienen una cantidad significativa de gas natural en solución, que se mantiene disuelto debido a las altas presiones del depósito. Cuando el petróleo pasa a la zona de baja presión del pozo, el gas deja de estar disuelto y empieza a expandirse. Esta expansión, junto con la dilución de la columna de petróleo por el gas, menos denso, hace que el petróleo aflore a la superficie.

A medida que se continúa retirando líquido del yacimiento, la presión del mismo va disminuyendo poco a poco, así como la cantidad de gas disuelto. Ésto hace que la

velocidad de flujo de líquido hacia el pozo se haga menor y se libere menos gas. Cuando el petróleo ya no llega a la superficie se hace necesario instalar una bomba en el pozo para continuar extrayendo el crudo.

Finalmente, la velocidad de flujo del petróleo se hace tan pequeña, y el costo de elevarlo hacia la superficie aumenta tanto, que el costo de funcionamiento del pozo es mayor que los ingresos que pueden obtenerse por la venta del crudo (una vez descontados los gastos de explotación, impuestos, seguros y rendimientos del capital). Esto significa que se ha alcanzado el límite económico del pozo, por lo que se abandona su explotación.

3.3.2. Producción secundaria (Inyección de agua)

Cuando se reduce considerablemente esta energía propia y la producción declina, se ingresa a la etapa secundaria, que consiste en la inyección (o inundación) de agua para darle energía adicional al yacimiento [5].

En un campo petrolero explotado en su totalidad, los pozos pueden perforarse a una distancia de entre 50 y 500 metros, según la naturaleza del yacimiento. Si se bombea agua en uno de cada dos pozos, puede mantenerse o incluso incrementarse la presión del yacimiento en su conjunto. Con ello también puede aumentarse el ritmo de producción de crudo; además, el agua desplaza físicamente al petróleo, por lo que aumenta la eficiencia de recuperación. En algunos depósitos con un alto grado de uniformidad y un bajo contenido en arcilla o barro, la inundación con agua puede aumentar la eficiencia de recuperación hasta alcanzar el 60% o más del petróleo existente. La inyección de agua se introdujo por primera vez en los campos petroleros de Pensilvania a finales del siglo XIX, de forma más o menos accidental y desde entonces se ha extendido por todo el mundo.



Figura 1. Producción Secundaria (Inyección de agua) en la extracción de Petróleo

La producción requiere que los fluidos que ingresan al pozo encuentren condiciones favorables para fluir hacia la superficie donde son procesados, separados y despachados al mercado.

El agua que se mueve en el reservorio llegará tarde o temprano al pozo de inyección para ser inyectada al pozo de producción. Si no hay instalaciones en la superficie para manipular y tratar esta mezcla y si hay otros pozos en el conjunto con exceso de capacidad, los pozos que producen agua simplemente se cierran y se olvidan. Conforme aumenta la demanda en los pozos de producción es necesario que se les inyecte agua para su mayor aprovechamiento, si no se cuenta con el equipo necesario para separar el agua del petróleo, entonces el pozo se cierra.

En un proyecto de recuperación secundario (inundación con agua), el agua se inyecta a un conjunto de pozos situados entre los pozos de producción. El agua arrastra el petróleo de los poros en el reservorio hacia el pozo. La cantidad de agua que se puede tolerar por cada pozo productor varía significativamente. En una inundación donde se produce separación y donde se inyectan grandes volúmenes, el límite económico máximo puede ser de 50 a 1, es decir, 50 barriles de agua producida y eliminada por cada barril de petróleo.

Los componentes primarios del agua producida dependen del agua específica que se está produciendo. Cuando se inyecta agua se tiende a enfatizar la preocupación por aquellos cationes que forman fácilmente sales o compuestos insolubles y llegan a obturar la formación, mientras que el agua eliminada en el océano es analizada principalmente por su contenido de petróleo y grasa.

En resumen, todos los pozos producen agua, cuya cantidad varía desde muy pequeña hasta varias veces el volumen de petróleo en los últimos períodos de vida del campo petrolífero. En la mayoría de los casos, la producción de agua es inevitable en la vida del pozo y los volúmenes pueden incrementarse drásticamente al producirse la filtración del agua a través del petróleo, hasta alcanzar el límite económico.

3.3.3 Producción terciaria o Recuperación Asistida

La producción de petróleo luego de estas dos etapas es del orden del 40% respecto de la cantidad del petróleo original *in situ*. Cuando la inyección de agua deja de ser efectiva teniendo en cuenta el costo/beneficio se procede a la tercera etapa o Recuperación Asistida, como la inyección de polímero, la inyección de gas o vapor, la inyección de micro-emulsiones, la combustión *in situ*, etc., dependiendo de las condiciones particulares del yacimiento [6].

3.4 Deshidratado y desalado de crudo

La deshidratación de crudo es el proceso mediante el cual se separa el agua asociada con el crudo, ya sea en forma emulsionada o libre, hasta lograr reducir su contenido a un porcentaje previamente especificado. Generalmente, este porcentaje es igual o inferior al 1 % de agua. Una parte del agua producida por el pozo petrolero, llamada agua libre, se separa fácilmente del crudo por acción de la gravedad, tan pronto como la velocidad de los fluidos es suficientemente baja. La otra parte del agua está íntimamente combinada con el crudo en forma de una emulsión de gotas de agua dispersadas en el aceite, la cual se llama emulsión agua/aceite (W/O).

Dependiendo del tipo de aceite y de la disponibilidad de recursos se combinan cualquiera de los siguientes métodos típicos de deshidratación de crudo: Químico, térmico, mecánico y eléctrico. En general, se usa una combinación de los métodos térmicos y químicos con uno mecánico o eléctrico para lograr la deshidratación efectiva de la emulsión W/O.

El tratamiento químico consiste en aplicar un producto desemulsionante sintético denominado en las áreas operacionales de la industria petrolera como "química deshidratante", el cual debe ser inyectado tan temprano como sea posible a nivel de superficie o en el fondo del pozo. Esto permite más tiempo de contacto y puede prevenir la formación de emulsión corriente abajo. La inyección de desemulsionante antes de una bomba, asegura un adecuado contacto con el crudo y minimiza la formación de emulsión por la acción de la bomba.

El tratamiento por calentamiento consiste en el calentamiento del crudo mediante equipos de intercambio de calor, tales como calentadores de crudo y hornos.

El tratamiento mecánico se caracteriza por utilizar equipos de separación dinámica que permiten la dispersión de las fases de la emulsión y aceleran el proceso de separación gravitacional. Entre ellos se encuentran los tanques de sedimentación llamados comúnmente tanques de lavado.

Para el tratamiento eléctrico se utilizan equipos denominados deshidratadores electrostáticos, y consiste en aplicar un campo eléctrico para acelerar el proceso de acercamiento de las gotas de fase dispersa [7].

El proceso de desalación consiste en la remoción de las pequeñas cantidades de sales inorgánicas, que generalmente quedan disueltas en el agua remanente, mediante la adición de una corriente de agua fresca (con bajo contenido de sales) a la corriente de crudo deshidratado.

Posteriormente, se efectúa la separación de las fases agua y crudo, hasta alcanzar las especificaciones requeridas de contenido de agua y sales en el crudo. Las sales minerales están presentes en el crudo en diversas formas: como cristales solubilizados en el agua emulsionada, productos de corrosión o incrustación insolubles en agua y compuestos organometálicos como las porfirinas.

Cuando el crudo es procesado en las refinerías, la sal puede causar numerosos problemas operativos, tales como disminución de flujo, taponamiento, reducción de la transferencia de calor en los intercambiadores, taponamiento de los platos de las fraccionadoras. La salmuera es también muy corrosiva y representa una fuente de compuestos metálicos que puede envenenar los costosos catalizadores.

El desalado en campo reduce la corrosión corriente aguas abajo (bombeo, ductos, tanques de almacenamiento). Adicionalmente la salmuera producida puede ser adecuadamente tratada para que no cause los daños mencionados en los equipos y sea inyectada al yacimiento, resolviendo un problema ambiental. En ausencia de cristales de sal sólidos, el contenido de sal en el crudo deshidratado está directamente relacionado con el porcentaje de agua y con la concentración de salinidad de la fase acuosa (ppm de NaCl).

El desalado se realiza después del proceso de rompimiento de la emulsión en deshidratadores electrostáticos y consiste de los siguientes pasos:

a) Adición de agua de dilución al crudo.

b) Mezclado del agua de dilución con el crudo.

c) Deshidratación (tratamiento de la emulsión) para separar el crudo y la salmuera diluida.

Como se muestra en la figura 2 el equipo convencional para el desalado incluye:

- Un equipo convencional de deshidratación (eliminador de agua libre, calentador o unidad electrostática).

- Una "tee" para inyectar el agua de dilución.

- Un mecanismo que mezcle adecuadamente el agua de dilución con el agua y las sales del crudo.

- Un segundo tratador (tipo electrostático o tratador-calentador) para separar nuevamente el crudo y la salmuera.



Figura 2. Sistema convencional de deshidratación y desalado de crudo

3.5 Separadores de Fases

Un separador es un recipiente de acero utilizado para separar gas, aceite y agua de una mezcla multifásica producida de pozos petroleros. Debido a su función es de vital importancia para la operación y buen desempeño de las instalaciones de producción de un campo.

Un recipiente de separación normalmente es el recipiente inicial de procesamiento en cualquier instalación, y el diseño inapropiado de este componente puede *embotellar* y reducir la capacidad de la instalación completa.

La clasificación de los separadores esta en función del número de fases que disgrega, son nombrados separadores bifásicos cuando separan dos fases, como petróleo y gas o agua y petróleo (2 sustancias que sean inmiscibles a una condición establecida). Los separadores trifásicos son aquellos en los cuales se han previsto, adicionalmente, una sección para la separación de la espuma que suele formarse en algunos tipos de fluidos. Tomando en cuenta la posición del cilindro se clasificaran en horizontales y verticales. Entonces se tendrán separadores horizontales bifásicos o trifásicos, según sea la posición del recipiente y el número de fases que separaran.



Figura 3. Ejemplo de la separación de fases en un separador horizontal

Existen dos factores principales que determinan el tamaño de los separadores, el primer factor es el tiempo de retención del fluido más ligero. Un tiempo considerable y un espacio de almacenamiento del fluido es requerido para asegurar que el aceite y el agua alcancen el equilibrio a la presión de separación.

El segundo factor que afecta el tamaño del recipiente es la velocidad de asentamiento de las gotas de aceite contenidas en el agua. Las gotas del líquido más pesado se asentarán a la velocidad determinada mediante la igualación de la fuerza de gravedad sobre las gotas y la fuerza de arrastre causada por el movimiento relativo a la fase continua de agua.



3.5.1. Separadores horizontales

Figura 4. Funcionamiento de un separador horizontal

El fluido entra y choca con el deflector para llevar a cabo una separación rápida y eficiente. En la mayoría de los diseños el deflector tiene un bajante que conecta el flujo del líquido debajo de la interfase aceite-agua. La sección del colector de líquido del tanque provee suficiente tiempo para que el aceite y el agua se separen por gravedad, como el agua libre es más pesada, ésta queda en el fondo del recipiente [8].

3.5.2. Separadores verticales

La figura 5 es un esquema de un separador vertical. En esta configuración el flujo de entrada entra al recipiente por un lado. A igual que con el separador horizontal, el desviador de ingreso hace la separación bruta inicial (modificador). El líquido fluye hacia abajo a la sección de recolección de líquidos en el recipiente, y luego baja a la salida de líquidos. Cuando el líquido llega al equilibrio, las burbujas de gas fluyen en sentido contrario a la dirección del flujo de líquidos y eventualmente migran al espacio de vapor. El controlador de nivel y la válvula de descarga de líquidos opera de la misma forma como en el separador horizontal. El gas fluye sobre el desviador de ingreso y luego arriba hacia la salida de gas. En la sección de asentamiento de gravedad, las gotas de líquido caen hacia abajo, en sentido opuesto a la dirección del flujo de gas. El gas pasa por la sección de fundición /

extractor de neblina antes de salir del recipiente. La presión y el nivel son mantenidos de la misma forma que en el separador horizontal [9].



Figura 5. El separador vertical es frecuentemente utilizado en plataformas costa afuera donde hay poco espacio en el piso y cuando la cantidad de gas es mayor que la del líquido

3.6 Mecánica de Fluidos

La *Mecánica de Fluidos* es una rama de la Física que estudia el comportamiento de los fluidos bajo la influencia de una fuerza total, resultado de la suma campos de fuerzas como el campo gravitatorio o el campo electromagnético. La mecánica de fluidos es fundamental en campos tan diversos como la aeronáutica, la ingeniería química, civil e industrial, la meteorología, las construcciones navales y la oceanografía.

La mecánica de fluidos puede subdividirse en dos campos principales: la estática de fluidos, o hidrostática, que se ocupa de los fluidos en reposo, y la dinámica de fluidos, que trata de los fluidos en movimiento [10].

3.7 Ley de Stokes

La ley de Stokes se refiere a la fuerza de fricción experimentada por objetos esféricos moviéndose en el seno de un fluido viscoso en un régimen laminar de bajos números de Reynolds. Fue derivada en 1851 por George Gabriel Stokes tras resolver un caso particular de las ecuaciones de Navier-Stokes. En general la ley de Stokes es válida en el movimiento de partículas esféricas pequeñas

moviéndose a velocidades bajas.

El balance de fuerzas sobre una gota (fase dispersa) que se mueve sobre un fluido (fase continua) puede ser representado por la ecuación 1.1.

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_{i}(t) = m_{d} \vec{a}(t) \qquad (Ecuación \ 1.1)$$

donde \overrightarrow{F} son las fuerzas que intervienen, m_a es la masa de la gota, \overrightarrow{a} es la aceleración. El balance causará que la gota se mueva en la dirección de la fuerza resultante.

Un concepto importante en la separación gravimétrica es la velocidad terminal o velocidad limite de un cuerpo. En el caso de la gota, cuando deja de acelerarse esta ascenderá a una velocidad constante alcanzando así su velocidad terminal. [11]

La velocidad terminal de una gota ascendiendo en una fase continua puede ser calculada con la ecuación de Stokes.

Donde:

 V_t = velocidad de ascenso o terminal de la fase dispersa μ = Viscosidad absoluta de la fase continúa ρ_o = densidad de la fase dispersa ρ_w = densidad de la fase continua d = diámetro de la partícula o gota a remover g = fuerza de la gravedad

3.8 Conceptos básicos

Viscosidad: La viscosidad es una propiedad macroscópica del fluido, de carácter intensivo (no depende de la cantidad de materia). Es aquella propiedad del fluido por la cual éste ofrece resistencia al corte o cizalle. Las unidades en que se mide la viscosidad surgen de manera natural al aplicar la llamada Ley de Newton: al aplicar un esfuerzo de corte τ sobre un fluido, el gradiente de velocidad $\frac{dv}{dy}$ es

proporcional al esfuerzo aplicado: $\tau = \mu \frac{dv}{dy}$

Es decir:

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy}$$
 (Ecuación 1.3)

Usando las dimensiones F, L, T para fuerza, longitud y tiempo:

$$\tau: FL^{-2}$$
 v: LT^{-1} y: L

se muestra que μ tiene las dimensiones FL⁻²T. En el sistema MKS, las unidades de la viscosidad son por lo tanto Ns/m². [12]

Observación: Siempre es posible plantear la Ley de Newton de la forma aquí expuesta, sin embargo, la viscosidad sólo será una constante para los llamados "fluidos newtonianos" (el agua es uno de ellos). En el caso más general, la viscosidad dependerá de alguna potencia de la rapidez de deformación. La ciencia que estudia dichas relaciones se denomina "Reología".

Tensión superficial: En la interfase entre un líquido y otra sustancia (líquido o gas) se forma una película especial, debido a la atracción de las moléculas que están en el seno del fluido. El efecto observado es que dicha película presenta una resistencia a la deformación, similar a una membrana elástica. La tensión que opone esta película es la llamada "tensión superficial". Alternativamente, la tensión superficial puede entenderse como una "energía por unidad de área interfacial".

Las unidades de la tensión superficial son: F/L o bien E/L^2 . En el sistema MKS, corresponden N/m.

Fuerza de Flotación: La fuerza resultante ejercida sobre un cuerpo por un fluido estático, en el cual está sumergido total o parcialmente, se denomina fuerza de flotación. Ésta siempre actúa verticalmente hacia arriba. Se demuestra a continuación, de manera muy simple, que dicha fuerza corresponde al peso de fluido desplazado por el cuerpo, la llamada "Ley de Arquímedes".

Considere la siguiente figura:



Figura 6. Fuerza de flotación de una esfera inmersa en un fluido estático

La fuerza vertical ejercida sobre un elemento del cuerpo de sección dA es:

$$dF_B = (p_2 - p_1)dA = \gamma \cdot hdA = \gamma \cdot dV \qquad (Ecuación 1.4)$$

donde p_1 es el peso específico de la esfera, p_2 es peso específico del fluido, *V* es el volumen del cuerpo sumergido, y γ es el peso específico del cuerpo. Integrando las contribuciones de todos los elementos:

$$F_{B} = \int_{V} \gamma dV = \gamma \int dV = \gamma V \qquad (Ecuación 1.5)$$

Número de Reynolds: En mecánica de fluidos, la aplicación del análisis dimensional lleva a la definición de un número adimensional, llamado número de Reynolds, que se define como:

$$\operatorname{Re} = \frac{Lv\rho}{\mu} \tag{Ecuación 1.6}$$

Donde ν,ρ,μ son la velocidad, densidad y viscosidad dinámica del fluido respectivamente. "L" en cambio, representa una longitud característica del fenómeno. En el caso de una esfera, dicha longitud es el diámetro "d":

$$\operatorname{Re}_{Esfera} = \frac{Dv\rho}{\mu}$$
 (Ecuación 1.7)

Físicamente, el número de Reynolds es un cociente entre las fuerzas inerciales (asociadas a la velocidad) y las fuerzas de resistencia viscosa (asociadas a la viscosidad).

Fuerza de arrastre [13]: Un cuerpo inmerso en un fluido, que se desplaza con velocidad relativa no nula respecto de éste, sufre una fuerza de resistencia al movimiento, debida al efecto neto de la presión ejercida por el fluido y del esfuerzo de corte producido por la viscosidad del fluido. La fuerza resultante de ambas contribuciones se denomina "arrastre". La expresión más general para el arrastre sobre cuerpos sumergidos es:

Arrastre =
$$C_D A \rho (v^2/2)$$
 (Ecuación 1.8)

donde A es el área normal proyectada en la dirección del flujo, ν la velocidad, ρ la densidad y C_D es el "coeficiente de arrastre". Este último es un número adimensional, que es función de la forma del cuerpo y del número de Reynolds. En el caso particular de esferas en régimen laminar, es decir para número de Reynolds <1, se aplica la ley de Stokes:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}}$$
(Ecuación 1.9)

Ésto es equivalente a:

Arrastre =
$$\underline{24}$$
 $A\rho v^2 = 3 \pi D \mu v$ (Ecuación 1.10)
 $Dv\rho/\mu 2$

3.9 Balance de fuerzas para una esfera inmersa en un fluido

Considere el siguiente diagrama de cuerpo libre para la esfera [14]:



Figura 7. Balance de fuerzas para una esfera inmersa en un fluido

Resulta claro que las fuerzas que actúan sobre la esfera cuando esta "cae" a través del fluido son el peso, la flotación y el arrastre, según se aprecia en la figura 7. Aplicando entonces la segunda ley de Newton, se tiene:

$$m\frac{d\,\mathbf{v}}{dt} = mg - \gamma V - 3\pi D\mu \cdot \mathbf{v} \qquad (Ecuación\ 1.11)$$

Notar que la fuerza de arrastre es proporcional a la velocidad, por lo que esta componente va aumentando a medida que el cuerpo se desplaza. De este modo, si transcurre el tiempo suficiente, la esfera alcanzará una velocidad constante, llamada "velocidad terminal", cuya expresión puede obtenerse directamente de la ecuación (1) al anular el término de la aceleración:

$$0 = mg - \gamma V - 3\pi D\mu v \qquad (Ecuación 1.12)$$

Luego de un despeje directo, se obtiene de la Ecuación 1.13:

$$\mathbf{v}_f = \frac{g \Delta \gamma D^2}{18\mu}$$

(Ecuación 1.13)

Donde $\Delta \gamma$ = peso específico de la esfera – peso específico del fluido.

La cual es equivalente a la ecuación 1.2:

$$V_t = \frac{g * d^2 (\rho_{o}, \rho_w)}{18 \mu}$$
Ecuación de Stokes

Como se observa, el balance de fuerzas en una esfera inmersa en un fluido estático no es complicado, éste se complica cuando el fluido se encuentra en movimiento, y arrastra a la partícula, haciendo que el movimiento de la esfera no sea en línea recta sino diagonal. (Figura 7.1), es decir los vectores de velocidad cambian, por esta razón los investigadores recurren a métodos numéricos para simular el flujo, como CFD, para resolver de manera correcta y adecuada del balance matemático, no solo para este caso, sino para muchos problemas más complejos a nivel industrial [15].





3.10 Ecuaciones de Diseño para un Separador

Las ecuaciones siguientes describen el dimensionamiento de un separador de fases para dos líquidos inmiscibles, las cuales están en función de la naturaleza del sistema que se desea diseñar. [16]

Ecuación de Stokes

$$V_{t} = g d^{2} (\rho_{o} - \rho_{w}) / (\mu_{l} * 18)$$
 (Ecuación 1.2)

Vt: Velocidad terminal (m/s)

- g: gravedad (m/s^2)
- d: diámetro de partícula (m)

µl: Viscosidad de la fase continua (agua) (Kg/ms)

 ρ : densidad del agua y aceite (Kg/m³)

18 es un factor de corrección para unidades en el Sistema Internacional.

Se plantea una relación entre la velocidad terminal y la velocidad horizontal que entran al separador como mezcla.

$$V_{h} = Z V_{t}$$
 (Ecuación 1.14)

Esta relación es clave en el diseño del separador, porque nos dirá en función del flujo de entrada, la velocidad con la que deberá entrar la corriente al separador. El valor de esta constante es determinada por la naturaleza del sistema, por lo que debe ser calculada para cada caso particular.

El término Deep Water se refiere al diámetro del separador que se encuentra mojado (ver figura 7), es decir la profundidad del agua dentro del separador. Se calcula con la ecuación:

$$D_{w} = \left(\frac{Q}{2V_{h}}\right)^{1/2}$$
 (Ecuación 1.15)

Donde:

D_w: Diámetro húmedo o mojado.

Q: El flujo de la mezcla que entra al separador

V_h: Velocidad horizontal.

Cálculo del diámetro del separador (D).

En la literatura se presenta que la relación $D_w/D = c$, donde c es una constante que oscila entre los 0.5 y 0.3.

 $D = D_w /c$ (Ecuación 1.16)

Cálculo de la Longitud del separador (L).

 $L = V_h * D_w / V_t \qquad (Ecuación \ 1.17)$

Cálculo del tiempo de residencia (τ)

 $\tau = L/V_h$ (Ecuación 1.18)

Finalmente al multiplicar las ecuaciones 1.1 y 1.6 obtenemos la distancia a la que sube cada partícula dentro del separador (ΔY).







3.11 CFD como herramienta para el análisis de mecánica de fluidos

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha impulsado el desarrollo y al mismo tiempo ha unificado el análisis de los campos de flujo presentes en los distintos requerimientos de la población día con día. El objetivo del diseño de un separador de fases para dos o tres fases es minimizar las perdidas y maximizar el desempeño de los separadores, considerando las restricciones geométricas físicas a las que se deba de operar. También son analizadas varias características del fluido y del fenómeno. Estas características son los fenómenos físicos tales como la separación de flujo, ondas de choque, la interacción de las capas límite, etc. Por lo tanto el grado de detalle de los resultados que se obtengan estará determinado por la elección del tipo de análisis que se desee realizar. Durante un análisis preliminar se pueden hacer algunas simplificaciones de tal manera que permitan modelar al flujo con menor detalle. Pero en un análisis detallado es necesario utilizar todas las capacidades y herramientas disponibles que nos proporciona en este caso CFD. El grado de precisión que puede ofrecer un programa de CFD y que hace que funcione adecuadamente como una herramienta de análisis de un flujo depende de importantes consideraciones que a continuación se describen [10]:

- El modelo matemático del flujo, el cual debe ser lo suficientemente preciso 1 de tal forma que presente aquellos aspectos del flujo que impactarán el desempeño del separador en este caso. La adecuada especificación de las condiciones de frontera para las ecuaciones que gobiernan.
- Si el modelo considera turbulencia en el campo de flujo debe elegirse el 2 modelo de turbulencia más adecuado que tome en consideración las características típicas del flujo.
- 3 La elección de la técnica numérica de solución, la cual puede resultar

determinante en el resultado. Ésto incluye la discretización de las ecuaciones que gobiernan.

- 4 La representación de la configuración geométrica de la región de análisis, es decir la construcción de dicha región por medio de una malla la cual deberá reflejar lo más próximo a la realidad física. La malla debe ser capaz de reproducir las formas complejas de los elementos que componen la región de análisis con gran detalle. Por ello existen distintos tipos de mallas las cuales satisfacen los requerimientos que cada análisis demande. La adecuada selección de la malla es esencial para asegurar la precisión tanto de la modelación geométrica como la del análisis del flujo.
- 5 El desempeño del programa también debe tomarse en cuenta para análisis detallados, ya que dada la naturaleza compleja de las ecuaciones a resolver, el software puede tomar varios días de tiempo de computo para obtener la solución. Por lo tanto, debe considerarse la optimización del software mediante el uso de paralelización.
- 6 El procesamiento y postprocesamiento debe considerarse también debido a la cantidad significativa de tiempo que debe invertirse para preparar el archivo de entrada (input) para el análisis y la interpretación de los resultados, una vez terminada la ejecución del programa.

3.11.1 Modelos Matemáticos

Para representar de una manera más precisa a través de una simulación numérica las características de un flujo que se encuentra en el interior de un separador bifásico es necesario que el modelo de flujo seleccionado sea el adecuado. La elección de cada uno de los modelos depende principalmente de la precisión que se desee obtener y de la región que se pretende analizar. Los modelos matemáticos hasta ahora utilizados para la descripción física del flujo dentro de un separador son:

Las ecuaciones de Navier- Stokes en conjunto con la ecuación de continuidad, y la ecuación de energía son empleadas para conocer los campos de presión, temperatura, densidad, velocidad, etc., y su variación en el tiempo. La ecuación que resulta de la aplicación del principio físico de la conservación de la masa, recibe el nombre de *ecuación de continuidad*, que en su forma vectorial se expresa como:

$\underline{\partial \rho} + \nabla \bullet (\rho V) = 0$	Ecuación de continuidad
∂t	

Al aplicar el principio de la conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación de gobierno que resulta es la *ecuación de Navier-Stokes,* cuya representación vectorial es:

 $\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) + \nabla \bullet (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \bullet (\tau_{ij}) + \rho \mathbf{f} \qquad Ecuaciones \ de \ Navier-Stokes$

El principio físico de la conservación de la energía, no es más que la primera Ley de la termodinámica, que expresada también en forma vectorial resulta en la *ecuación de la energía:*

 $\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \bullet (EV) = \rho q + \nabla \bullet q - \nabla \bullet (pV) + \nabla \bullet (\tau_{ij}V) + \rho f \bullet V \qquad Ecuación \ de \ energía$

Para este trabajo solo se utilizaron las ecuaciones de Navier-Stokes.

3.11.2 Condiciones de frontera

Es importante ahora mencionar que la solución de las ecuaciones se realizan sobre un espacio finito definido determinado por la malla computacional, por lo que para obtener un resultado apropiado de la física del flujo para un modelo matemático determinado dentro de el espacio computacional, es importante establecer un conjunto de condiciones de frontera específicas para las ecuaciones que gobiernan. Tres diferentes tipos de fronteras espaciales son las que generalmente están presentes en los componentes de un separador bifásico o trifásico:

- 1 Fronteras sólidas: consisten en todas las paredes sólidas como las superficies de los modificadores de flujo, las paredes del separador, y todos aquellos pasajes donde se encuentren elementos sólidos. Para este tipo de fronteras es apropiado establecer la condición de no deslizamiento, es decir el elemento sólido tiene una velocidad relativa igual con cero.
- 2 Fronteras de entrada y salida de flujo: consisten en especificar las propiedades y características del flujo de entrada y salida de la corriente, tales como: la velocidad y dirección del flujo, la presión y la temperatura, etc.
- 3 Fronteras periódicas: las fronteras periódicas son utilizadas para modelar tal y como su nombre lo expresa, la naturaleza repetitiva de un flujo.

3.11.3 Métodos de discretización y técnicas numéricas de solución

El proceso que se sigue generalmente para obtener la solución computacional de un problema determinado, consiste básicamente de dos etapas. La primera etapa consiste en transformar las ecuaciones de gobierno en su forma diferencial o integral y las condiciones de frontera e iniciales en un sistema discreto de ecuaciones algebraicas, las cuales se aplican en puntos discretos o celdas de la malla computacional. A esta primera etapa se le conoce como discretización. La siguiente etapa consiste en el reemplazo de los términos diferenciales presentes en las ecuaciones de gobierno, por las expresiones algebraicas obtenidas de la discretización para formar un sistema algebraico de ecuaciones. El sistema algebraico de ecuaciones que se obtiene de la discretización se resuelve mediante técnicas de solución numéricas las cuales permiten generar algoritmos de cómputo y así obtener la solución aproximada. Entre los métodos de discretización se encuentran:

3.11.4 Método de volumen finito (FVM)

Dependiendo de la formulación de las ecuaciones de gobierno (forma integral o diferencial) éstas pueden descretizarse utilizando los métodos anteriores.

En seguida se describirán brevemente algunas de las características destacables de cada uno de estos métodos de discretización utilizados.

El método de diferencias finitas aproxima las derivadas que se encuentran en las ecuaciones diferenciales de gobierno por expresiones en diferencias formuladas en los puntos de discretización del espacio computacional. En los métodos de volumen finito se discretizan las ecuaciones de gobierno en su forma integral. Estas ecuaciones se aplican a pequeños volúmenes de control alrededor de cada punto de la malla computacional. Esta aproximación asegura que la masa, la cantidad de movimiento y la energía se conserven en cada formulación, algo semejante ocurre en el método de elemento finito.

3.11.5 Método de las Diferencias Finitas (FDM)

La filosofía de las soluciones vía las diferencias finitas es reemplazar las derivadas que aparecen en las ecuaciones de conservación, ya sean Navier-Stokes, Euler, etc., por cocientes de diferencias algebraicas que generan ecuaciones para las variables del campo de flujo en puntos específicos de la malla. El tipo de diferencia finita que se utiliza para reemplazar las derivadas parciales puede seleccionarse de un gran número de formas distintas, las cuales dependen de la exactitud que se desee para la solución, de la convergencia, de la estabilidad y de la conveniencia.

3.11.6 Método de Elemento Finito (FEM)

Los métodos de elemento finito se introdujeron en la mecánica de fluidos a finales de los años 70's y fueron implementados en códigos computacionales para realizar simulaciones hasta casi los años 80's. el método de elemento finito desde su creación ha sido enfocado al análisis de problemas en la mecánica estructural. Sin embargo, se han utilizado exitosamente en aplicaciones de la dinámica de fluidos, aún cuando su desarrollo inicial no contemplaba a ésta área como objetivo de aplicación. La razón se debía principalmente a las dificultades de los términos no lineales en las ecuaciones de Navier- Stokes. Entre los esquemas de solución de los flujos compresibles vía métodos de elemento finito están: los métodos Taylor- Galerkin (TGM), los métodos característicos (CGM) y los métodos discontinuos de Galerkin (DGM). En los métodos de elemento finito, al igual que en los otros métodos siempre se ha buscado desarrollar un esquema que sea útil para resolver todos los regimenes de flujo y sea capaz de tratar el flujo compresible y el flujo incompresible como un todo. Una característica importante que debe tener estos esquemas numéricos para el cálculo del flujo compresible es la habilidad de resolver las discontinuidades que puedan estar presentes.

CAPITULO 4

METODOLOGIA DE SIMULACION

El procedimiento propuesto en este trabajo fue el de diseñar un canal (observar Figura 8) cuyas dimensiones fueron establecidas para no trabajar con millones de mallas y así disminuir el tiempo de simulación. Cada malla esta en función del diámetro de partícula mas pequeño que se desea separar, que en este caso es de 50 μ m. La ventaja de este diseño es que se omiten los detalles de como entra el fluido al separador y pasa de un régimen turbulento a uno laminar por medio de inhibidores de turbulencia (ver figura 8). La metodología propuesta para las simulaciones determinará de forma precisa una respuesta bajo diferentes condiciones de operación.



DELIMITACION DEL PROBLEMA

Figura 9. Delimitación del problema del separador horizontal a la geometría utilizada en la simulación

Se construyó gráficamente con el software Gambit*, un canal de 3 mm de ancho por 50 mm de largo y se realizó una discretización con dos mallas distintas, 240000 y 60000 nodos.

*Gambit es un software que permite a los usuarios construir geometrías usando las herramientas básicas de construcción para después importar los archivos a CFD

EJEMPLO DE DISCRETIZACIÓN

÷



Figura 10. Ejemplificación de la discretización utilizada en la simulación para 60 000 nodos con un diámetro de partícula de $50\mu m$ y 240 000 nodos con un diámetro de partícula de 25 μm

Se decidió utilizar una geometría de dimensiones pequeñas, debido a que al inyectar partículas de el orden de 50 μ m el número de mallas, en este caso 60 000, fueron suficientes para realizar la simulación. Al utilizar una geometría de dimensiones industriales (metros), las mallas en el canal hubiesen sido del orden de millones, por lo cual el tiempo de cómputo para que los resultados convergieran seguramente hubiera sido de días o semanas.

Por la razón anterior se realizó la simulación con 60 000 y 240 000 nodos, para hacer una comparación en cuanto a tiempo de cómputo.

La inyección de las gotas se hace en la base de canal debido a que la fase dispersa ya entra a un régimen laminar, delimitando un separador de fases después de que la emulsión ha chocado con los inhibidores de flujo convirtiendo el flujo turbulento a flujo laminar para comenzar la separación.





En la condición de frontera de entrada, se establece la velocidad horizontal de la fase continua que circula dentro del canal bajo un régimen laminar, a la que llamaremos V_h (Ver tabla 1)

Tabla 1. Diámetro de la fase dispersa inyectada y V_h utilizadas en las simulaciones.

Diámetro de gotas de	Velocidad horizontal de la fase continua, m/s.			
aceite	Velocidad Inicial (V.I)	4 Veces V.I	12 V.I	16 V.I
50 µm	7.5 E -05	3 E -04	9 E -04	1.2 E -03
100 µm	3 E -04	1.2 E -03	3.6 E -03	4.5 E -03
200 µm	1.2 E -03	4.8 E -03	0.0144	0.018

Utilizando CFD se resolvieron las ecuaciones de continuidad y movimiento de Navier Stokes considerando un flujo multifásico, isotérmico (temperatura ambiente), en dos dimensiones y dos discretizaciones (240,000 y 60,000 mallas).

CAPITULO 5

RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En la *Figura 11* se muestra cómo se observa en CFD la estela de gotas de aceite cuando se inyectan en la frontera de entrada y en la parte superior del canal de 3 mm de ancho y 50 mm de largo. La concentración de estas partículas es de 0.05 en fracción volumen, en una malla de 240 000 celdas.



Figura. 12. Contornos de fracción volumétrica de una estela de gotas de aceite en una corriente de agua, diámetro de burbuja 100 micrómetros. La discretización del canal es de 240,000 celdas

Como se puede observar en la Figura 11, la trayectoria de las gotas de aceite no es vertical. Esto es debido a los efectos de las fuerzas de arrastre de la fase continua que se tiene sobre la fase dispersa. Las fuerzas boyantes, producidas por el ascenso de la fase dispersa, modifican el campo de velocidades de la fase continua (como se comprobara más adelante).

La estela alcanza la pared superior del canal en una longitud promedio de 0.003 m. La fracción volumétrica de gotas de aceite tiene su valor más alto en el punto de inyección y el punto donde la estela choca con la pared superior del canal. La concentración de la fase dispersa se diluye sobre la fase continua a medida que el aceite recorre o sube por el canal.

En la *Figura 12* se muestran los vectores de velocidad referentes a la Figura 11. de la estela de aceite que asciende a través de la corriente de agua. La fase continua fluye por el canal en régimen laminar a una V_h muy cercana a 0.0003 m/s



Figura 13. Campo de velocidad de la fase dispersa. Los vectores de la coordenada Y muestran el ascenso de las gotas de aceite de 100 micrómetros. Discretización del canal 240000 celdas

Se realizan dos cortes a la figura 12, uno a 0.0002 m y otro a 0.000295 m de la altura del canal, y se estima la velocidad terminal promedio de las gotas de aceite. Para el corte en Y=0.0002 m la velocidad terminal promedio fue de 0.00029908 m/s. Para la línea que corta en Y = 0.000295 m, *V*_t promedio fue de 0.00029889 m. Las desviaciones de la velocidad obtenida en la simulación con las calculadas con la ecuación 1 se muestran en la tabla 2.

Estos cortes se hicieron para demostrar que la velocidad terminal aumenta hasta que llega a su límite en la parte superior del canal.

Tabla 2. Comparación de la velocidad terminal (V_t) de las gotas de aceite calculadas y simuladas para el caso con 240000 y 60000 nodos, utilizando la ecuación de Stokes, y las obtenidas con CFD. Estos resultados se pueden observar con más detalle en la figura 12.

<i>Vt₁</i> calculada con la ecuación de Stokes (ver ecuación 2)	0.0003016 m/s	Error = $\frac{V_{t2} - V_{t1}}{V_{t2}} * 100$
Vt_2 para el corte en Y = 2E-03 m 240,000 mallas	2.99E-04 m/s	0.83 %
Vt_2 para el corte en Y = 2.95E-03 m 240,000 mallas	2.98E-04 m/s	0.89%
Vt_2 para el corte en Y = 2E-03 m 60,000 mallas	2.93E-04 m/s	2.8 %
Vt_2 para el corte en Y= 2.95E-03 m 60,000 mallas	2.94E-04 m/s	2.19 %

Como se puede observar en la Tabla 2. La comparación de resultados en cuanto a porcentajes de error demuestra que el trabajar con 240,000 nodos se obtiene un error menor al obtenido con 60 000 nodos, por lo cual se puede decir que a pesar de que los errores son pequeños, en cuanto a tiempo de computo, trabajar con

60,000 nodos es mejor pues el tiempo en que los resultados convergen es de casi la mitad.

Las mismas tendencias se observan para 50 y 200 micrómetros.

Tabla 3. Velocidad terminal calculada con la ecuación de Stokes para distintos diámetros de partícula.

Diámetro de gota	50 μm	<i>100</i> µm	<i>200</i> µm
Velocidad terminal, m/s	7.5399E-05	3.016E-04	1.20638E-03

5.1 Análisis de la deformación de la fase continua debido a las fuerzas de flotación de la fase dispersa. Simulación realizada con un diámetro de 50 μ m variando la velocidad horizontal (fase continua)

Las fuerzas de flotación producidas por el ascenso de gotas de aceite en la corriente de agua provocan una deformación en los campos de velocidad en la fase continua. A continuación se muestran imágenes obtenidas de la simulación en CFD donde se pueden observar los contornos de velocidad en m/s de la fase continua y dispersa antes y después que la estela de aceite interaccione con la corriente de agua.



Figura 14. a. Contornos de velocidad de la fase continua a régimen laminar, el agua circula a una velocidad promedio de 7E-05 m/s.

En la Figura 13.a. se observan los contornos de velocidad de la fase continua a régimen laminar cuando aun no se han inyectado las gotas de aceite.



• Velocidad de la corriente de agua a la entrada: 7.5 E – 05 m/s

Figura 14.b. Trayectorias y campos de velocidad en la mezcla de la fase continua al ser modificados por las fuerzas de flotación de la fase dispersa.



Se observan las trayectorias y los campos de velocidad en la mezcla de la fase continua cuando estos son modificados por las fuerzas de flotación de la fase dispersa.

Figura 14.b.1. Representación de los contornos de la velocidad terminal de la fase dispersa cuando la velocidad promedio del agua es de 7E-05 m/s.

Se observa cómo al principio del canal las gotas de aceite suben sin ningún problema, debido a que las fuerzas de flotación de la fase dispersa predominan sobre las fuerzas inerciales de la fase continua.



• Velocidad de la corriente de agua a la entrada: 3 E – 04 m/s

Figura 14. c. Aumento la velocidad de entrada del agua a 3 E –04 m/s.

Se aumentó la velocidad de entrada del agua a 3 E –04 m/s. Se observan los contornos de velocidad en la mezcla en donde es evidente que las fuerzas de flotación siguen predominando sobre las fuerzas inerciales ya que se sigue presentando una deformación en la trayectoria del fluido.



Figura 14.c.1. Contornos de velocidad de la fase dispersa cuando la velocidad de entrada del agua es de 3 E–04 m/s.

Se muestran los contornos de velocidad de la fase dispersa. Se observa cómo a comparación de la Figura 13.b.1, la estela de gotas de aceite sube a una mayor distancia de la entrada del canal, nótese que la velocidad terminal no cambia. Esto demuestra que aun aumentando 4 veces la velocidad horizontal siguen predominando las fuerzas de flotación.



• Velocidad de la corriente de agua a la entrada: 9E – 04 m/s

Figura 14.d. Deformación en los contornos de velocidad de la mezcla cuando la velocidad de entrada del agua es de 9 E –04 m/s

Aun con un incremento de 12 veces la velocidad inicial de la corriente de agua, se sigue observando una pequeña deformación en los contornos de velocidad de la mezcla. Sigue predominando por muy poco la fuerza de flotación sobre la inercial.



Figura 14.d.1. Contornos de velocidad de la fase dispersa cuando la velocidad de entrada del agua es de 9 E –04 m/s.

Se observa cómo a pesar de que las fuerzas de flotación casi igualan a las inerciales, el aceite sube a la misma velocidad terminal, pero toca la superficie del canal a una distancia más alejada de la entrada del mismo. La velocidad horizontal aumenta 12 veces, la velocidad terminal es constante.



• Velocidad de la corriente de agua a la entrada: 1.2E – 03 m/s

Figura 14. e. Deformación de los contornos de velocidad de la mezcla cuando la velocidad de entada del agua es de 1.2 E -03 m/s.

Al aumentar la velocidad horizontal 16 veces, se puede observar que las líneas de velocidad en la mezcla ya no se deforman. Esto demuestra que las fuerzas inerciales ya son mayores que las fuerzas de flotación de la fase continua.



Figura 14.e.1. Contornos de velocidad de la fase dispersa cuando la velocidad de entrada del agua es de 1.2 E -03 m/s.

Esta figura muestra cómo la fase dispersa ya no toca la superficie del canal. Ésto es porque ahora las fuerzas inerciales dominan sobre las fuerzas de flotación, a pesar de que la velocidad terminal no cambia. La velocidad horizontal es más grande y ya no permite la separación del aceite en la mezcla.

Las mismas tendencias de los ejemplos anteriores se observaron para 100 μ m y 200 μ m.

5.2 Relación entre la velocidad horizontal y la velocidad terminal

A continuación se definirá una expresión, la cual relaciona la velocidad horizontal de la fase continua y la velocidad terminal calculada con la ley de Stokes para las gotas de aceite, a la cual se le llamará $V_{h/t}$, que es simplemente el cociente entre la velocidad horizontal y la velocidad terminal.

Al realizar las simulaciones con CFD, se encontró que cuando $V_{h/t}$ es igual a 15, las fuerzas inerciales de la fase continua predominan, de tal forma que la velocidad de ascenso de la fase dispersa comienza a tener variaciones durante el tiempo de residencia en el canal. Se observa que la fase dispersa es arrastrada por la fase continua, es decir evita por completo la separación de las dos fases desde la entrada al canal, hasta el término del mismo.



Figura 15. A distintos valores de $V_{h/t}$ se muestra la fracción volumétrica de la fase dispersa para un diámetro de partícula de 50 μ m a lo largo del canal

5.3 Análisis de la Relación $V_{h/t}$ = 13 en el diseño de separadores horizontales de agua- petróleo

Se tienen los siguientes valores para el cálculo de un separador horizontal aguapetróleo [17]:

 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ d = 0,0001 m $\mu = 0,00179 \text{ Kg. / ms}$ $\delta w = 999 \text{ Kg. / m}^3$ $\delta o = 900 \text{ Kg. / m}^3 \text{ (suponiendo que es petróleo pesado)}$ $V_t = 0,000301425 \text{ m/s}$

Para un conjunto de pozos promedio en México (Región Norte)** se tienen los siguientes valores [18]:

 $1.08 * 10^{3}$ Barriles de agua /día = $1.72 * 10^{2} m^{3} / día$ $1.80 * 10^{2}$ Barriles de petróleo / día = $2.86 * 10^{1} m^{3} / día$

Al tratarse de una emulsión agua-petróleo se suman los valores:

 $1.72 * 10^{2} m^{3} / día + 2.86 * 10^{1} m^{3} / día = 2.00 * 10^{2} m^{3}_{emulsión} / día$

**La producción en la región Norte de la Republica Mexicana es de aproximadamente 90,000 Barriles por día y hay un estimado de 300 pozos en desarrollo. Utilizando la producción secundaria (inyección de agua) se puede recuperar hasta un 60% del crudo que se encuentra dentro del pozo. Si se toma en cuenta que por cada barril de petróleo se obtienen 6 de agua, entonces la producción seria de 1.08 * 10 3 Barriles de agua /día y 1.80 * 10 2 Barriles de petróleo / día.

Haciendo la conversión a sistema internacional obtenemos un Flujo de:

 $\mathbf{Q}_{\mathbf{v}} = 139.1096979 \ L_{de\ emulsión} \ / \ min = 0.002318495 \ m^3 \ / \ s$

Utilizando la relación $V_h = 13 V_t$

 $V_h = 0.00391852 \text{ m/s}$

Calculando el Diámetro mojado y ocupando c = 0.5 obtenemos el **Diámetro del separador:**

 $D_w = (Q/(2*V_h))^{(1/2)} = 0.543910035 \text{ m}$

 $D = D_w / 0.5 = 1.08782007 m$

Enseguida se calcula la Longitud del separador:

 $L = V_h * D_w / V_t =$ 7.070830458 m

El cálculo de un diámetro y longitud correctos depende mucho de V_h = 13 V_t , ya que si esta relación no fuera la adecuada para el sistema se sobrediseñaría el separador, provocando mayores costos de inversión, o por el contrario que el separador fuera mas pequeño (ver Tabla 4) y por lo tanto no se llevaría a cabo una separación completa de la emulsión.

Una vez obtenidos la longitud dé separador y V_h , se calcula el tiempo de residencia, para así saber cuanto tiempo tardan en salir del separador las gotas de aceite.

 $\tau = L/V_h = 1804.464763 \ s$

Multiplicando el tiempo de residencia y V_t obtenemos la distancia a la cual sube cada partícula de petróleo:

 $\Delta Y = \tau * V_t = 0.54391 \text{ m}$

Como se puede observar, $\Delta Y = D_w$, lo cual comprueba que las partículas de petróleo si logran separarse, es decir suben hasta la interfase aire- emulsión.

La función $V_{h/t}$ depende directamente de las características del sistema, las propiedades de líquidos que entran como emulsión al separador, y del diámetro de partícula más pequeño que se desea separar.

A continuación se analizarán los casos cuando la relación $V_{h/t}$ =15 y $~V_{h/t}$ =12 para el caso anterior.

Diseño	$V_{h/t} = 12$	$V_{h/t} = 13$	$V_{h/t} = 15$
Diámetro (m)	1.13	1.09	1.01
Longitud (m)	6.79	7.08	7.6
τ (s)	1878	1804	1679.86

Tabla 4. Análisis de $V_{h/t} = 12$, $V_{h/t} = 13$ y $V_{h/t} = 15$

Si se hubiera utilizado una relación menor como $V_{h/t} = 12$, la longitud del separador no hubiera sido suficiente para lograr que el petróleo subiera a la superficie y se lograra una separación eficiente. Haciendo una comparación de τ con $V_{h/t} = 13$, éste es mayor, lo cual indica que para una longitud menor se necesita mas tiempo para que las dos fases se separen. Evidentemente la separación no se llevaría a cabo por completo.

Por el contrario si $V_{h/t} = 15$, entonces la longitud del separador es más grande, y el tiempo de residencia disminuye, por lo que la separación se realizaría mucho antes de que se llegara al final del tanque. Por lo tanto, se realizaría la separación, pero se invertiría inútilmente en costos de operación y se ocuparía mas espacio del necesario dentro de la planta de tratamiento.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

- Al realizar la simulación con CFD utilizando el canal que se diseño con 60,000 nodos se obtienen resultados con un porcentaje de error menor al 3%, y con 240,000 nodos, el error es menor al 1% pero comparando el tiempo de computo de la simulación este diseño converge hasta casi el doble del tiempo del que requiere el diseño con 60,000 nodos. Por lo tanto este trabajo se realizo con 60,000 nodos, para acelerar las simulaciones, aunque se tuvieron errores mínimos.
- CFD realiza el balance de las fuerzas inerciales, de flotación y gravedad ajustándose perfectamente a la ecuación de Stokes. Lo anterior indica que el software se puede ajustar a otros fluidos y condiciones iniciales para calcular velocidades de ascenso o terminales.
- Cuando el cociente V_{h/t} es igual o mayor a 15, las fuerzas de arrastre de la fase continua predomina e inhibe la separación de la fase dispersa por método gravimétrico.
- De este trabajo se obtiene que para lograr una separación gravimétrica eficiente en un sistema bifásico de dos fluidos inmiscibles, la velocidad horizontal máxima que es la que rige las fuerzas inerciales y a la cual debe fluir la fase continua sea menor a 13 veces la velocidad terminal de la fase dispersa que se calcula con la ecuación de Stokes, basada en el diámetro de partícula de aceite que se desea separar.
- El valor sobre la velocidad terminal de las partículas en un lecho depende de las propiedades de los fluidos que se deseen separar, así como también del tamaño de las partículas (mientras mas grandes sean las partículas, más rápido se separarán), dicha velocidad es calculada con la ecuación de Stokes. Por lo tanto la relación de velocidades (V_{h/t}) cambiara para ajustarse a las ecuaciones de diseño para separadores bifásicos que API (Amercian Petroleum Institute [16]) propone, con lo cual se obtendrán las dimensiones optimas de un separador bifásico horizontal y se logrará una separación gravimétrica eficiente.

CAPITULO 7

BIBLIOGRAFIA

[1] Simulación numérica de un pozo productor de aceite con un sistema de separación de fondo para el control de agua en pozos petroleros. Maestro en Ingeniería. Oscar Omar Cuin Macedo. Facultad de Ingeniería UNAM. 2004

[2] Droplet-settling vs. retention-time theories for sizing oil/water separator. Arnold Kenneth E., Koszela Paul J. (1990) SPE Production Engineering, 5 (1), pp. 59-64 16640.

- [3] <u>http://www.opec.org</u>
- [4] <u>http://www.imp.mx</u>

[5] Teoría y diseño del bombeo hidráulico. Alexis Eloy Cordero Warner, Horacio Ortega Benavides. Facultad de Ingeniería. UNAM 200.

[6] Tesis. Ingeniería de Pozos. Efraín Briceño, Omar Ruiz Araiza. Facultad de Ingeniería. UNAM 2001.

[7] Lucas R. N. (1976) "Electrical dehydration and desalting of crude Oil"

[8] Design of oil-handling systems and facilities, Arnold, Ken,. Maurice Stewart 2nd ed. [Houston, Texas]: Butterworth-Heinemann, c1999. (1942). pp 101- 160.

[9] Oil /Water Separators. Stormwater Best Management Practices – Permanent Storm Water Treatment Controls. January 2002.

[10] Tesis. Simulación numérica de flujo compresible en alabes de una Turbina.Ing. Angélica Membrillo Roseta. Facultad de Ingeniería. UNAM 2006.

[11] Análisis para las ecuaciones de Navier –Stokes para un caso particular. Erick Treviño Aguilar. Facultad de ciencias UNAM. 1998.

[12] Fenómenos de Transporte. R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. (2003).

[13] Mecánica de fluidos. Robert L. Mott, Javier Enríquez Brito, Javier León Cárdenas, Colaborador Javier Enríquez Brito, Javier León Cárdenas. Pearson Educación, 2006, pág. 530-533.

[14] Modelo Hidrodinámico para la Velocidad de un Par de Burbujas Ascendiendo en Línea. Hydrodynamic Model for the Velocity of a Bubble Pair Rising In-line. Información Tecnológica-Vol. 18 N°4-2007, pág.: 63-74 Jorge Ramírez-Muñoz, Alberto Soria y Elizabeth Salinas-Rodríguez

[15] On the dinamic thermal state in a hydrodinamic bearing with a wirling journal using CFD techniques. Journal of trybology, 118,556-363. Trucker, P. G., & Keogh P.S. 1996.

[16] Oil Water Separators.Runoff treatment BMPs. API criteria for Oil-Water separators. Volume V. Chapter 11. January 2003.

[17] Perry, Manual del Ingeniero Químico. Perry, Robert H., Don W. Green JamesO. Maloney, Mc Graw Hill, 1992

[18] http://www.pemex.com

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción Secundaria (Inyección de agua) en la extracción de Petróleo6
Figura 2. Sistema convencional de deshidratación y desalado de crudo9
Figura 3. Ejemplo de la separación de fases en un separador horizontal10
Figura 4. Funcionamiento de un separador horizontal11
Figura 5. El separador vertical es frecuentemente utilizado en plataformas costa afuera
donde hay poco espacio en el piso y cuando la cantidad de gas es mayor que la del
líquido12
Figura 6. Fuerza de flotación de una esfera inmersa en un fluido estático14
Figura 7. Balance de fuerzas para una esfera inmersa en un fluido16
Figura 7.1. Balance de fuerzas de una esfera inmersa en un fluido estático y en
movimiento17
Figura 8. Dimensiones para el diseño de un separador horizontal19
Figura 9. Delimitación del problema del separador horizontal a la geometría utilizada en
la simulación23
Figura 10. Ejemplificación de la discretización utilizada en la simulación para 60,000
nodos con un diámetro de partícula de 50µm y 240,000 nodos con un diámetro de
partícula de 25 μm24
Figura 11. Geometría utilizada en la simulación matemática, dibujada con el software GAMBIT24
Figura. 12. Contornos de fracción volumétrica de una estela de gotas de aceite en una corriente de agua, diámetro de burbuja 100 micrómetros. La discretización del canal es de 240,000 celdas
Figura 13. Campo de velocidad de la fase dispersa. Los vectores de la coordenada Y muestran el ascenso de las gotas de aceite de 100 micrómetros. Discretización del canal 240,000 celdas
Figura 14. a. Contornos de velocidad de la fase continua a régimen laminar, la velocidad promedio del agua es de 7E-05 m/s28
Figura 14.b. Trayectorias y campos de velocidad en la mezcla de la fase continua al ser modificados por las fuerzas de flotación de la fase dispersa
Figura 14.b.1. Representación de los contornos de la velocidad terminal de la fase dispersa cuando la velocidad promedio del agua es de 7E-05 m/s
Figura 14. c. Aumento la velocidad de entrada del agua a 3 E –04 m/s

Figura 14.c.1.	Contornos de	velocidad	de la fase	dispersa	cuando la	a velocidad	de entrada
del agua es de	3 E –04 m/s						30

Figura 14.d.1. Contornos de velocidad de la fase dispersa cuando la velocidad de entrada del agua es de 9 E –04 m/s......32

Figura 14.e. Deformación de los contornos de velocidad de la mezcla cuando la velocidad de entada del agua es de 1.2 E -03 m/s......32

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diámetro de la fase dispersa inyectada y V_h utilizadas en las simulaciones......25

Tabla 4. Análisis de V_{h/t} = 12, V_{h/t} = 13 y V_{h/t} = 15......36

APENDICE

- A: área normal proyectada en la dirección del flujo
- c : es una constante que oscila entre los 0.5 a 0.3 para el calculo de D_w
- C_D: coeficiente de arrastre
- ρ : densidad
- ho_o : densidad de la fase dispersa
- $\rho_{\rm w}$: densidad de la fase continua
- d: diámetro de partícula
- D: diámetro del separador
- D_w: diámetro húmedo o mojado
- ΔY : distancia que sube cada partícula dentro del separador
- $\Delta\gamma$: peso específico de la esfera peso específico del fluido
- g: fuerza de gravedad
- F_A: fuerza de Arrastre
- F_B: fuerza Boyante
- γ : Peso específico del cuerpo
- Kg: kilogramos
- L: longitud del separador
- m: metros
- p1: peso especifico de una esfera sumergida en un fluido
- p2: peso específico del fluido
- Q: flujo de la mezcla que entra al separador
- Re: número de Reynolds.
- s: segundos
- τ : tiempo de residencia
- $\boldsymbol{\nu} {:}$ velocidad de una partícula que es arrastrada
- μ : viscosidad
- μ l: viscosidad de la fase continua (agua)
- V: volumen del cuerpo sumergido en un fluido
- V_h: velocidad horizontal.
- Vt: velocidad de asentamiento o terminal
- Z: constante que relaciona $V_{h}\ y\ V_{t}$