

EVALUACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE EMULSIONES  
CRUDO EN AGUA EMPLEANDO MEMBRANAS MICROPOROSAS

NATALIA LÓPEZ MARÍN  
ELIZABETH RINCÓN PUERTA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MEDELLÍN

2013

EVALUACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE EMULSIONES  
CRUDO EN AGUA EMPLEANDO MEMBRANAS MICROPOROSAS

NATALIA LÓPEZ MARÍN

ELIZABETH RINCÓN PUERTA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

MAURICIO GIRALDO

Ingeniero Mecánico, PhD

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

2013

A mi familia por su amor y apoyo incondicional.  
A mi madre por su ejemplo y compañía en los momentos más difíciles.  
A mi peque por la comprensión, paciencia y amor que me brindó durante esta etapa.  
A mi amiga por su apoyo y dedicación en este proyecto.  
A Dios por poner grandes personas en mi camino y colmarme de bendiciones día tras día.

**Natalia**

A mi familia, por su amor, cariño y constante confianza.  
A mi novio, por creer en mí más que nadie, por su compañía y apoyo incondicional.  
A mi compañera en este proyecto, por su dedicación, compromiso y amistad.

**Elizabeth**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Pontificia Bolivariana, especialmente al programa de Ingeniería Química, por la formación otorgada.

Al Doctor Mauricio Giraldo, docente, tutor y guía, por su asesoría y dedicación en la realización de este proyecto.

Al Grupo de Energía y Termodinámica y a todos aquellos que de alguna forma hicieron posible la realización de este trabajo.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	14
1.1 GENERALIDADES DEL CRUDO .....	14
1.1.1 Clasificación de hidrocarburos.....	14
1.1.2 Propiedades .....	15
1.2 MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD .....	18
1.2.1 Dilución de crudos pesados.....	18
1.2.2 Calentamiento .....	18
1.2.3 Formación de emulsiones crudo en agua (O/W).....	19
1.3 FORMACIÓN DE EMULSIONES CRUDO EN AGUA USANDO MEMBRANAS MICROPOROSAS .....	19
1.3.1 Membranas microporosas .....	19
1.3.2 Proceso de formación de emulsiones .....	20
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA .....	23
2.2 ECUACIONES GOBERNANTES.....	24
2.3 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	26
2.4 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS.....	27
2.5 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	28
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	29
3.1 OBSERVACIONES GENERALES.....	29

3.2	TAMAÑO PROMEDIO DE LAS GOTAS .....	46
3.3	TASA DE PRODUCCIÓN DE LA EMULSIÓN .....	48
3.4	CONSUMO ENERGÉTICO .....	50
3.5	MODELO MATEMÁTICO .....	52
4.	CONCLUSIONES.....	55
5.	BIBLIOGRAFIA.....	57
6.	ANEXOS .....	63
6.1	DOCUMENTO PROCEDIMENTAL PARA DETERMINAR EL DIÁMETRO DE LAS GOTAS EN UNA EMULSIÓN CRUDO EN AGUA .....	63

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efectos de la temperatura en la viscosidad de crudos pesados (Hasan, Ghannam, & Esmail, 2010).....	16
Figura 2. Diagrama esquemático de proceso de emulsificación con membranas (Joscelyne & Trägårdh, 2000).....	21
Figura 3. Fuerzas que actúan en la formación de una gota (Schröder, Behrend, & Schubert, 1998).....	21
Figura 4. Formación y deformación de la gota desde el poro bajo diferentes condiciones (a) fuerza de fricción baja o despreciable; (b) alta fuerza de fricción en comparación con la tensión superficial; (c) ángulo de contacto muy pequeño o demasiada fuerza de fricción; (d) superficie de la membrana húmeda por la fase dispersa (Peng & Williams, 1998).....	22
Figura 5. Configuración de flujos .....	24
Figura 6. Caso 1 en $t = 0$ s.....	30
Figura 7. Caso 1 en $t = 0$ s, $t = 7000$ s y $t = 14000$ s.....	30
Figura 8. Caso 1 en $t = 14000$ s.....	31
Figura 9.(a) Caso 1 en $t = 24000$ s.(b) Detalle de gota a desprender.....	32
Figura 10. Caso 2 en $t = 0$ s, $t = 10000$ s y $t = 20000$ s.....	33
Figura 11. (a) Caso 2 en $t = 32000$ s. (b) Detalle de gota a desprender.....	34
Figura 12.Caso 3 en $t = 0$ s, $t = 5000$ s y $t = 10000$ s.....	35
Figura 13. (a) Caso 3 en $t = 18000$ s. (b) Detalle de gota a desprender.....	35
Figura 14. (a) Caso 4 en $t = 40000$ s. (b) Caso 5 en $t = 30000$ s.....	37
Figura 15. Caso 6 en $t = 0$ s, $t = 6500$ s y $t = 13000$ s.....	38
Figura 16. (a) Caso 6 en $t = 23000$ s. (b) Detalle de gota a desprender.....	39
Figura 17. Caso 7 en $t = 40000$ s.....	40
Figura 18. Caso 8 en $t = 0$ s, $t = 4500$ s y $t = 9000$ s.....	40
Figura 19. (a) Caso 8 en $t = 17000$ s. (b) Detalle de gota a desprender.....	41
Figura 20. Caso 9 en $t = 40000$ s.....	42

Figura 21. (a) Caso 10 en  $t = 0$  s,  $t = 12500$  s y  $t = 25000$  s. (b) Caso 11 en  $t = 0$  s,  $t = 6500$  s y  $t = 13000$  s. (c) Caso 12 en  $t = 0$  s,  $t = 4500$  s y  $t = 9000$  s..... 43

Figura 22. (a) Caso 10 en  $t = 41000$  s. (b) Detalle de gota a desprender..... 44

Figura 23. (a) Caso 11 en  $t = 28000$  s. (b) Detalle de gota a desprender..... 45

Figura 24. (a) Caso 12 en  $t = 23000$  s. (b) Detalle de gota a desprender..... 45



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los petróleos según su °API (Corredor & Valero, 2004).....	15
Tabla 2. Propiedades de Black Oil de Caño Limón (Corredor & Valero, 2004). ....	17
Tabla 3. Propiedades de los fluidos en la emulsión (Corredor & Valero, 2004).....	27
Tabla 4. Variables de entrada modificadas en la simulación.....	28
Tabla 5. Diámetro promedio de las gotas ( $\mu\text{m}$ ) .....	47
Tabla 6. Tasa de producción de la emulsión (l/h).....	49
Tabla 7. Potencia W/poro requerida para diferentes caídas de presión .....	50
Tabla 8. Costos de producción de 1 m <sup>3</sup> de emulsión empleando membranas microporosas .....	51
Tabla 9. Coeficientes obtenidos para correlacionar el diámetro promedio de las gotas ...	53
Tabla 10. Diámetro promedio de las gotas para caso de verificación.....	54

## RESUMEN

La mayor parte de los recursos de petróleo del mundo corresponde a hidrocarburos viscosos y pesados, que son difíciles y caros de extraer y refinar. Por lo general, mientras más pesado o denso es el petróleo crudo, menor es su valor económico, ya que los crudos pesados tienden a poseer mayores concentraciones de metales y otros elementos, lo que exige más esfuerzos y erogaciones para la extracción de productos utilizables (Alboudwarej, y otros, 2006).

Con la gran demanda y los altos precios del petróleo, y estando en declinación la producción de la mayoría de los yacimientos de petróleo convencionales, la atención de la industria en muchos lugares del mundo se está desplazando hacia la explotación de petróleo pesado. En Colombia el petróleo pesado promete desempeñar un rol muy importante en el futuro de la industria petrolera, por lo que la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol) afirmó su interés en incrementar su producción, revisar las estimaciones de reservas, comprobar las nuevas tecnologías e invertir en infraestructura, para asegurarse de no dejar atrás sus recursos de petróleo pesado, que representan actualmente el 60% de la producción diaria de petróleo en el país (Palotas Kelen & Vanegas Angarita, 2011).

De acuerdo a las metas de producción de la industria del petróleo en Colombia, este proyecto proporciona un medio alternativo para resolver un problema de transporte en la cadena productiva del crudo, y su aplicación aporta a la implementación de técnicas para recuperar el petróleo pesado abundante en los yacimientos colombianos (ECOPETROL, 2012).

Se evalúa la formación de una emulsión crudo en agua a partir de los parámetros que la gobiernan, utilizando membranas microporosas para reducir la variación en el tamaño de las gotas, con el fin de obtener una emulsión prácticamente monodispersa y mejorar así la estabilidad de la mezcla. Se identifican inicialmente las ecuaciones del modelo

matemático que gobiernan y describen el fenómeno, con el fin de definir las variables del proceso a ser ajustadas e implementadas en una simulación computacional. Se realiza la simulación del proceso de formación de la emulsión con las variables y parámetros establecidos, de modo que los resultados obtenidos son analizados para determinar las condiciones adecuadas de formación de la emulsión y la influencia de las propiedades de los fluidos involucrados y las variables operacionales, como la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana, en el tamaño final de las gotas. Finalmente se realiza un levantamiento de costos que permite comparar el uso de membranas frente a los métodos tradicionalmente empleados para la creación de emulsiones en este campo usando como parámetro de comparación el costo energético.

**PALABRAS CLAVES: EMULSIÓN, MEMBRANAS MICROPOROSAS, SIMULACIÓN NUMÉRICA, CRUDO PESADO, COSTO ENERGÉTICO.**

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día los oleoductos en Colombia están en condiciones de transportar alrededor de 900.000 barriles diarios que generan un costo aproximado por bombeo de US\$3'000.000 al día (ECOPETROL, 2012), debido a viscosidades del crudo pesado mayores a  $10^3$  cP a 298.15 K, grados API menores a 20° y las condiciones geográficas propias del país; sin tener en cuenta las paradas de producción por obstrucción de las tuberías y la corrosión de las mismas por concentraciones de sulfuros y metales pesados como Vanadio y Níquel mayores al 3% en peso (Mathpro, 2011). Como alternativas para mejorar la operación del transporte de crudo pesado durante los últimos años se ha evaluado el craqueo in-situ, reducción de la fricción en las paredes del oleoducto y reducción de la viscosidad (Martínez Palou, y otros, 2011).

La reducción de la viscosidad se puede lograr por calentamiento del crudo o de la tubería aunque conlleva a costos operativos y de capital elevados debido a que se deben alcanzar y mantener temperaturas mayores a 373.15 K (Grupo de Energía y Termodinámica, 2012). También se realiza dilución del crudo con hidrocarburos líquidos más livianos o alcoholes; sin embargo, es necesario un proceso de separación al final del transporte para eliminar el solvente y un detallado conocimiento de la composición del petróleo para determinar la relación óptima crudo/solvente que logre el valor de viscosidad requerido. Otro método para reducir la viscosidad es la formación de emulsiones crudo en agua (O/W) donde la selección, cantidad y costo del agente tensoactivo de la emulsión es relevante (Koris, Piacentini, Vatai, Drioli, & Giorno, 2011).

Una emulsión O/W es una mezcla de los líquidos inmiscibles donde la fase crudo es dispersada en el agua que es la fase continua. En la preparación de emulsiones se emplean técnicas de alta energía que incluyen homogenizadores de alta presión, sistemas de rotor-estator, equipos dispersores y molinos coloidales que utilizan fuertes tensiones de cizallamiento. De igual forma se emplean técnicas de bajas tensiones de

cizallamiento como emulsificación con membranas, emulsificación espontánea y microcanales (Sadurni, Solans, Azemar, & García Celma, 2005).

Los requerimientos energéticos para las emulsiones que se realizan con métodos de alta energía son aproximadamente de \$427.00 por cada metro cúbico de emulsión producida, para un costo de la energía eléctrica de 350 \$/kW·h. Lo anterior se debe a que solo una fracción de la energía suministrada se utiliza en el rompimiento de las gotas, el 99,8% de la energía suministrada se pierde en forma de calor y se emplean presiones de hasta 100 MPa para producir 50 m<sup>3</sup> de emulsión por hora con tamaños de gota por debajo de 20 µm (Perez Marzulli, Cardenas, & Bullon, 2010).

Por su parte la emulsificación con membranas microporosas permite la producción de una fase monodispersa; un tamaño de gota promedio entre 0.1 y 10 micras, y una distribución de tamaño, conocida como distribución Rosin - Rammler, entre 0.5 y 1.8 µm, lo que permite lograr una estabilidad hasta de nueve meses para emulsiones que contienen aproximadamente de 28 a 30% de agua (Laurencio Alfonso & Delgado Drubey, 2007).

Simular computacionalmente el proceso de emulsificación con membranas microporosas permite predecir el comportamiento, tamaño y distribución de las gotas en la fase dispersa; además de tener la posibilidad de evaluar el efecto de variables críticas a la hora de realizar la emulsión, como lo son la tensión superficial y la presión a través de la membrana, y encontrar los valores óptimos para cumplir los requerimientos que se tengan en cuanto a estabilidad y dispersión de la emulsión sin necesidad incurrir en costos para realizar prototipos del proceso o para evaluar el desempeño de los mismos en caso de tenerlos.

Se evaluó entonces la formación de una emulsión crudo en agua empleando membranas microporosas a partir de algunos parámetros como la relación de viscosidades entre los dos fluidos, la tensión superficial, la caída de presión a través de la membrana y la velocidad de la fase continua. Se identificaron las ecuaciones del modelo matemático que describen el fenómeno en las membranas microporosas y se realizó la simulación del proceso de formación de la emulsión con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de formación de la emulsión; de modo que su aplicación sea un aporte a las técnicas para mejorar el transporte del petróleo pesado abundante en los yacimientos colombianos.

## 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 GENERALIDADES DEL CRUDO

El petróleo o crudo es una mezcla homogénea de hidrocarburos. Contiene trazas de azufre, oxígeno y nitrógeno bajo la forma de compuestos tales como sulfuro de hidrógeno, mercaptanos R-SH, disulfuros y polisulfuros (R-S-S-R)<sub>n</sub>, ácidos nafténicos, entre otros. Se utiliza principalmente para la obtención de diversos productos derivados como lo son lubricantes, gases licuados de petróleo (GLP), fueloil, nafta, kerosene, combustibles para aviación, gasoil, entre otros.

#### 1.1.1 Clasificación de hidrocarburos

Los hidrocarburos que conforman el crudo se clasifican de acuerdo a la combinación de los átomos de carbono con los átomos de hidrógeno en:

**Hidrocarburos cíclicos y naftenos:** Hidrocarburos de estructura cíclica de cualquier número de carbonos, generalmente de 5 y 6 carbonos, con o sin ramificaciones en su estructura.

**Hidrocarburos alifáticos, saturados, parafinas:** Las parafinas e isoparafinas son el principal componente de las fracciones ligeras del crudo. Se definen como hidrocarburos de cadena abierta ramificada (isoparafinas) o sin ramificar (parafinas). Son de fácil obtención pero poca estabilidad.

**Hidrocarburos aromáticos:** Presentan dentro de su estructura tres dobles enlaces C-C. Son los compuestos más pesados del crudo y su composición varía de acuerdo a la fuente de obtención, además de ser la estructura más estable de los hidrocarburos cíclicos no saturados y por ende la más frecuente.

### 1.1.2 Propiedades

El crudo posee características claramente definidas como la densidad, la viscosidad, el número de octanos y las propiedades térmicas.

#### Densidad

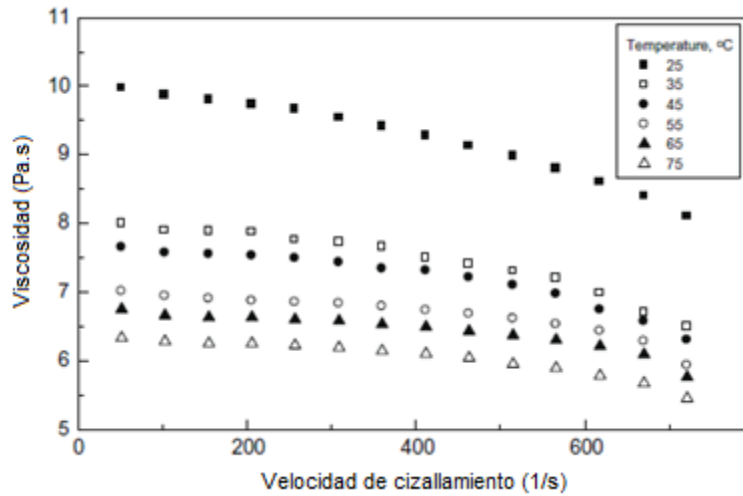
Es la relación entre el peso y el volumen de determinada muestra a una temperatura T. Para los crudos es común encontrar la medida de la densidad en grados API. Cuanto más ligero es un crudo, mayor es su número de °API. La clasificación por °API consiste en la comparación de la densidad del petróleo con la del agua a condiciones estándar (Densidad Relativa). De esta manera un crudo con mayor densidad que la del agua se denomina crudo extrapesado y se clasifica entre 0 y 10°API; un valor mayor a 10 en °API indica una densidad relativa menor a 1, tal como se indica en la Tabla 1 (Corredor & Valero, 2004).

**Tabla 1.** Clasificación de los petróleos según su °API (Corredor & Valero, 2004)

<b>Aceite Crudo</b>	<b>Densidad relativa</b>	<b>°API</b>
Extrapesado	> 1.0	0 - 10
Pesado	1.0 - 0.93	10 - 20
Medio	0.93 - 0.87	20 - 30
Liviano	0.87 - 0.83	30 - 39
Superliviano	< 0.83	> 39

## Viscosidad

Magnitud física que mide la resistencia interna al flujo de un fluido. La magnitud de la viscosidad depende de la conformación química del crudo, de manera que a mayor proporción de fracciones ligeras, menor es la viscosidad. Este valor depende además de la temperatura ambiente, de forma que cuanto menor resulta ésta, más viscoso es un crudo (Corredor & Valero, 2004), dicho comportamiento se ilustra en la Figura 1.



**Figura 1.** Efectos de la temperatura en la viscosidad de crudos pesados (Hasan, Ghannam, & Esmail, 2010)

## Número de octanos

Es la característica fundamental de las naftas o carburantes utilizados en los motores de encendido por bujía. Determina las cualidades de combustión del carburante y sus condiciones óptimas de utilización (Corredor & Valero, 2004), ya que es una medida de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas para evitar las detonaciones y explosiones en el pistón previo a la llegada de éste al punto muerto superior. Esa calidad antidetonante se mide usando una escala arbitraria de número de octano. En esta escala, se dio a los hidrocarburos iso-octano (que es poco detonante) un índice de octano de cien (100); y al n-heptano (que es muy detonante), un índice de octano de cero (0). Así, por



ejemplo, si una gasolina presenta propiedades antidetonantes similares a una mezcla de 95% de iso-octano y 5% de n-heptano, se dice que tiene un número de octano de 95.

### Propiedades térmicas

Estas propiedades definen el comportamiento térmico del crudo. Dentro de las principales se encuentra el calor específico, poder calorífico, conductividad térmica, punto de ebullición y punto de inflamación. Estas propiedades dependen del crudo evaluado. Para el caso de uno de los crudos típicos colombianos, el extraído en Caño Limón, dichas propiedades se muestran en la Tabla 2 (Corredor & Valero, 2004).

**Tabla 2.** Propiedades de Black Oil de Caño Limón (Corredor & Valero, 2004).

<b>Propiedades</b>	
Viscosidad (104 °F)	13.9 cSt
Viscosidad (212 °F)	3.5 cSt
Poder Calorífico Bruto	19215 BTU/lb
Poder Calorífico Neto	18129 BTU/lb
Punto de Ebullición	105.8 °F
°API	29.4
Gravedad Específica	0.879
Presión de Vapor (60 °F)	0.8 psi
Punto de fluidez	35 °F
Punto de inflamación	45 °F
°API Diesel en Caño Limón (60 °F)	31.8
Gravedad Específica Agua de Producción	0.998

## **1.2 MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD**

Una de las mayores dificultades en el transporte del crudo por los oleoductos es la alta viscosidad del fluido, por lo que se requiere de formas eficientes y económicas para transferir el crudo pesado. Los crudos pesados tienen una densidad similar o incluso superior a la del agua; son altamente viscosos con una consistencia que va desde una melaza pesada hasta un sólido a temperatura ambiente.

Debido a lo anterior, estos aceites pesados no se bombean fácilmente por las tuberías; además por las altas concentraciones de sulfuros y metales pesados como níquel y vanadio (Hasan, Ghannam, & Esmail, 2010).

Se han utilizado diferentes métodos con el fin de reducir la viscosidad de los crudos pesados para el transporte por tuberías. Por ejemplo, la dilución con crudos más livianos o alcoholes, calentamiento, y la utilización de surfactantes para estabilizar emulsiones son algunos de los métodos más comunes.

### **1.2.1 Dilución de crudos pesados**

Consiste en la adición de hidrocarburos líquidos livianos comúnmente condensados de la producción de gas natural y de crudos livianos. Esta es una opción efectiva para reducir la viscosidad y facilitar la movilidad y bombeo en la tubería. Sin embargo, este método requiere recalculer las condiciones de bombeo del petróleo puesto que los volúmenes a bombear aumentan, además de técnicas de separación del solvente para su reutilización en otras mezclas (Martínez Palou, y otros, 2011). Adicionalmente, implica el transporte del diluyente hacia los campos de producción, lo cual puede incrementar significativamente el costo de producción.

### **1.2.2 Calentamiento**

Este método consiste en mantener constante la temperatura del crudo a lo largo de su transporte, normalmente a la temperatura a la cual se obtiene de los yacimientos. Se

requiere de calentamiento externo del crudo debido a la pérdida de calor por los largos trayectos, bajos flujos y los espacios sin usar de la tubería. El calentamiento del crudo se puede realizar directamente a través de intercambiadores de calor y quemadores, o indirectamente calentando el oleoducto (Martínez Palou, y otros, 2011).

### **1.2.3 Formación de emulsiones crudo en agua (O/W)**

Una emulsión crudo en agua es una mezcla de dos líquidos inmiscibles donde la fase crudo es dispersada dentro de la fase continua o el agua. A menudo se producen emulsiones O/W para reducir la viscosidad de crudos pesados de manera que éstos puedan ser transportados fácilmente por los oleoductos. La emulsión adquiere una fluidez y viscosidad similar a la del agua, siendo más fácil y económico su bombeo que en el caso del crudo puro. Lo anterior hace de las emulsiones una alternativa frente al uso de solventes o los costos energéticos de un calentamiento (Martínez Palou, y otros, 2011).

## **1.3 FORMACIÓN DE EMULSIONES CRUDO EN AGUA USANDO MEMBRANAS MICROPOROSAS**

Durante los últimos 20 años se ha venido trabajando las membranas microporosas como una técnica de formación de emulsiones con una alta aplicación en la industria debido a su simplicidad, baja demanda energética, poca utilización de surfactantes, así como pequeños tamaños y la buena distribución de las gotas en la fase continua (Joscelyne & Trägårdh, 2000).

### **1.3.1 Membranas microporosas**

Las membranas microporosas son estructuras de pared delgada con una morfología esponjosa abierta de un tamaño de poro controlado que varía comúnmente entre 0.03 y 10  $\mu\text{m}$  (Odicino, Follari, & Lesino, 2011). Esta tecnología se desarrolló durante la década del 60 y es un tema de investigación y desarrollo que tiene un gran impulso

debido a sus múltiples aplicaciones, en especial en las industrias de alimentos, medicina y farmacéutica.

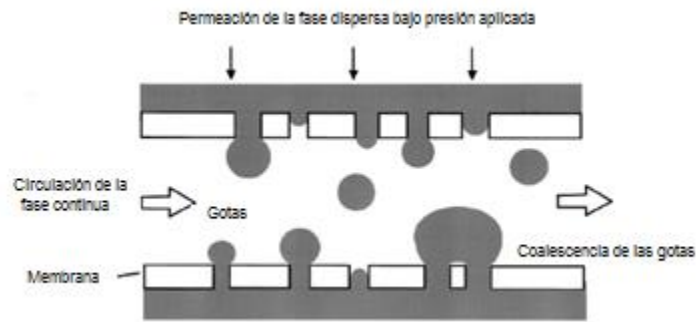
Las membranas pueden dividirse en dos grandes categorías: las membranas orgánicas, que se obtienen a partir de polímeros orgánicos; y las membranas inorgánicas, que se obtienen a partir de materiales cerámicos, vidrios, carbón o metales, siendo éstas el tipo de membranas más comúnmente empleadas en los procesos de emulsificación (Guizard, 1999).

La primera investigación realizada sobre el uso de emulsificación por membrana puede remontarse hasta finales de 1980 cuando Nakashima et al. fabricaron una membrana de vidrio particular, llamada Shirasu de vidrio poroso (SPG por sus siglas en inglés, Shirasu Porous Glass), y produjeron exitosamente emulsiones de queroseno en agua y de agua en queroseno con tamaño uniforme (Nakashima, Shimizu, & Kukizaki, 1991).

Muchas de las investigaciones publicadas han sido llevadas a cabo empleando membranas de vidrio microporoso tubulares (MPG por sus siglas en inglés, Tubular Micro-Porous Glass) y las membranas Shirasu de vidrio poroso. Estas membranas son conocidas por tener microporos uniformes, cilíndricos e interconectados, además presentan una distribución de tamaño estrecha; sin embargo también han sido empleadas membranas de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  cerámicas o recubiertas con óxido de titanio o circonio (Joscelyne & Trägardh, 2000).

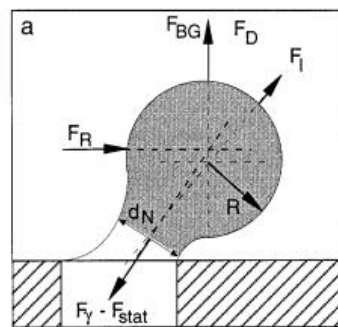
### **1.3.2 Proceso de formación de emulsiones**

En el proceso que se muestra en la Figura 2, la fase dispersa pasa a través de los microporos de la membrana, mientras la fase continua fluye a lo largo de la superficie de ésta.



**Figura 2.** Diagrama esquemático de proceso de emulsificación con membranas (Joscelyne & Trägårdh, 2000)

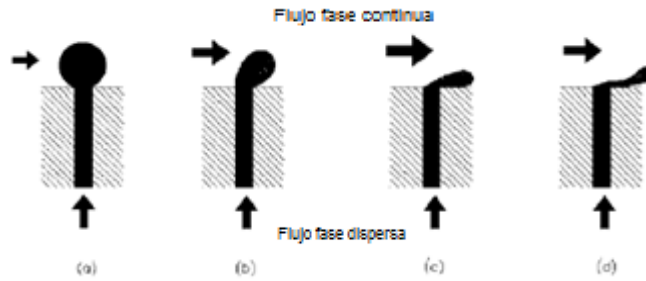
Las gotas crecen en el poro de la membrana hasta alcanzar cierto tamaño y desprenderse. Esto se logra por el equilibrio entre la fuerza de arrastre de la fase continua sobre la gota ( $F_D$ ), la flotabilidad de ésta ( $F_{BG}$ ), la tensión interfacial ( $F_Y$ ) y la presión de arrastre ( $F_{stat}$ ) como se muestra en la Figura 3 (Schröder, Behrend, & Schubert, 1998).



**Figura 3.** Fuerzas que actúan en la formación de una gota (Schröder, Behrend, & Schubert, 1998)

Las gotas en el poro tienden formarse esféricamente debido a la tensión interfacial; sin embargo, se pueden presentar deformaciones dependiendo de la rata de flujo de la fase continua, el ángulo de contacto entre la gota y la membrana (Peng & Williams, 1998), la

viscosidad de la fase dispersa, la presión de inyección de la fase dispersa, entre otros factores; como se ilustra en la Figura 4.



**Figura 4.** Formación y deformación de la gota desde el poro bajo diferentes condiciones (a) fuerza de fricción baja o despreciable; (b) alta fuerza de fricción en comparación con la tensión superficial; (c) ángulo de contacto muy pequeño o demasiada fuerza de fricción; (d) superficie de la membrana húmeda por la fase dispersa (Peng & Williams, 1998)

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

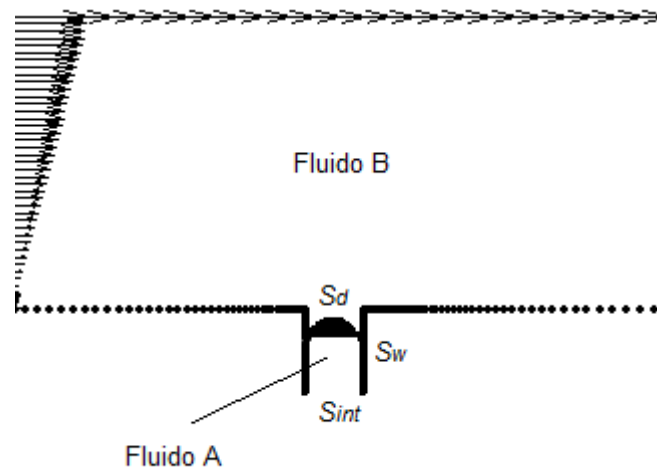
Para evaluar la formación de una emulsión crudo en agua empleando membranas microporosas se realiza en primer lugar una identificación a partir de la literatura científica y técnica de los parámetros químicos y fluidodinámicos asociados al proceso, junto con la determinación de los valores de los mismos empleados tradicionalmente. Una vez se tiene esta información, es llevada a un programa de simulación numérica existente donde se realizan las simulaciones computacionales correspondientes y posteriormente un análisis de datos para comparar los resultados obtenidos con respecto a los reportados en la literatura para los métodos tradicionales de emulsificación.

### 2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

En este primer paso se busca establecer los elementos fundamentales asociados al sistema sobre el cual se realiza la simulación a partir de casos reportados en la literatura y revisiones bibliográficas previamente realizadas. Dentro de esta primera etapa, se tiene un enfoque hacia la definición de las variables y parámetros que tienen una incidencia mayor sobre el proceso, tales como la tensión superficial, caída de presión a través de la membrana, densidad y viscosidad de cada una de las fases.

El sistema a simular debe estar definido por una geometría específica como se muestra en la Figura 5. La fase dispersa pasa a través de los microporos de la membrana formando el dominio denominado  $\Omega_{int}$ , mientras la fase continua fluye a lo largo de la superficie de ésta, a través del dominio llamado  $\Omega_e$ , donde las gotas se distribuyen formando la emulsión deseada. Teniendo en cuenta que la fase dispersa pasa a través de la membrana, se definen como fronteras de dicha fase las paredes del poro ( $S_w$ ) y la superficie por donde ingresa la fase dispersa ( $S_{int}$ ). Debido a la diferencia de presión a

través de la membrana, se forman las gotas en los poros de la membrana y entran en contacto directo con la fase continua, generándose una interfase entre los dos fluidos denominada  $S_d$ , la cual pertenece a las fronteras de la fase dispersa.



**Figura 5.** Configuración de flujos

## 2.2 ECUACIONES GOBERNANTES

Tanto el flujo de la fase dispersa como el de la fase continua debe satisfacer las ecuaciones de conservación de momento y continuidad, las cuales en el caso de un bajo número de Reynolds (comúnmente las escalas de velocidad y altura de los fluidos en este tipo de aplicaciones aseguran estas condiciones) se reducen al sistema de ecuaciones de Stokes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$



Donde

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} -p\delta_{ij} + \mu_e \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & x \in \Omega_e \\ -p\delta_{ij} + \mu_{int} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & x \in \Omega_{int} \end{cases} \quad (3)$$

En las ecuaciones (1) - (3),  $\vec{u}$  es la velocidad,  $p$  la presión,  $\delta_{ij}$  el delta de Kronecker,  $\mu_e$  y  $\mu_{int}$  es la viscosidad de los fluidos externo e interno respectivamente. Dado que  $S_d$  es una frontera compartida, son necesarias condiciones de velocidad y tensión superficial tal como se muestran a continuación:

$$[\vec{u}]_{S_d} = 0 \quad (4)$$

$$[\sigma_{ij}n_j]_{S_d} = \gamma n_i \frac{\partial n_k}{\partial x_k} \quad (5)$$

Donde  $[\ ]_{S_d}$  denota el salto a través de la superficie de la gota  $S_d$  desde  $\Omega_e$  hasta  $\Omega_{int}$ . En las ecuaciones (4) y (5),  $\gamma$  es la tensión superficial,  $\vec{n}$  es el vector unitario normal hacia afuera, relativo a  $\Omega_{int}$ , y  $\partial n_k / \partial x_k$  es la curvatura de la superficie.

Adicionalmente, en la interfase del fluido se debe satisfacer la siguiente condición cinemática:

$$\frac{d\vec{x}(\xi)}{dy} = \vec{u}(\xi) \quad (6)$$

Donde  $\vec{u}(\xi)$  es la velocidad de la interfase del fluido en el punto  $\xi$ .  $\xi$  representa un punto en cualquier superficie del problema (Giraldo, Williams, Florez, & Power, 2011).

### 2.3 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Se revisa en la literatura disponible las características del proceso de formación de una gota en la superficie de una membrana microporosa, con el fin de conocer el comportamiento reportado del sistema y realizar las simplificaciones pertinentes de acuerdo al régimen de flujo que se presenta. De esta revisión se obtienen las condiciones bajo las cuales el proceso puede ser modelado empleando un sistema de ecuaciones de Stokes.

La simulación numérica se realiza mediante el programa de simulación desarrollado por Giraldo, Mauricio, el cual emplea el método de Elementos de Frontera para la simulación de un fluido bifásico bajo condiciones de flujo Stokes. Dicho software es el encargado de la solución del sistema de ecuaciones de acuerdo a los parámetros del proceso ingresados por el usuario. Dado que las membranas microporosas presentan dimensiones características en el orden de micrómetros, se realiza un ajuste de las variables y los parámetros propios del modelo a esta escala (Giraldo, Power y Flórez 2007).

Dentro de la implementación de la herramienta computacional se emplea un mecanismo de avance en el tiempo de incrementos fijos con un Método de Runge Kutta orden dos. Dado que el problema a evaluar puede presentar inestabilidad respecto al tamaño de este paso de tiempo, se realiza una experimentación numérica donde el comportamiento del proceso se comprueba una vez ha transcurrido un determinado número de estos incrementos constantes. Partiendo de esta evaluación se determina la viabilidad de emplear este paso de tiempo para la simulación completa. Adicionalmente se ingresa el número de pasos en el tiempo, los valores de viscosidad de la gota, viscosidad de la fase continua, tensión superficial, diferencia de densidad de los dos fluidos, valor de la constante de aceleración gravitacional.

Finalmente la visualización de los perfiles de tamaño de gota en el tiempo se realiza mediante el software matemático MATLAB a partir de un código de programación que utiliza los resultados obtenidos en la simulación.

## 2.4 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS

A partir del perfil de tamaño de gota en el tiempo, se determina el diámetro final de la gota para los valores de parámetros previamente establecidos. Los resultados obtenidos son comparados con los reportados en la literatura para la formación de emulsiones empleando sistemas rotor-estator y de homogenización mecánica a partir de una relación de tamaño de partícula y costo energético.

Adicionalmente se evalúa el efecto de la variación de algunos de los parámetros de entrada sobre las variables de salida. Dentro de estas variaciones, se considera la caída de presión a través de la membrana y la velocidad de la fase continua, y las variables de salida a evaluar son el diámetro promedio de gota, la tasa de producción de la emulsión y el costo energético.

En la Tabla 3 se muestran los parámetros de entrada fijos. Para el desarrollo de las simulaciones se selecciona un yacimiento de crudo pesado en Colombia, específicamente el de Caño Limón con el fin de hacer uso de las propiedades de una muestra de petróleo real y se fija la membrana con un tamaño de poro de 10  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 3.** Propiedades de los fluidos en la emulsión (Corredor & Valero, 2004).

Parámetros	Valor
Viscosidad de la gota (Pa·s)	$1.22 \cdot 10^{-2}$
Viscosidad de la fase continua (Pa·s)	$8.33 \cdot 10^{-4}$
Tensión superficial (mN/m)	3.4
Diferencia de densidades ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	119.21

Para evaluar la influencia de la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana sobre las variables de salida, se realizan variaciones en estos parámetros de entrada asignando tres valores diferentes para el primero y cuatro para el segundo, de la forma que se indica en la Tabla 4, donde los casos se muestran numerados de acuerdo al orden de ejecución.

**Tabla 4.** Variables de entrada modificadas en la simulación

Presión a través de la membrana (kPa)	Velocidad de la fase continua (m/h)		
	0.02	0.03	0.04
100	Caso 10	Caso 11	Caso 12
150	Caso 2	Caso 1	Caso 3
200	Caso 4	Caso 6	Caso 8
300	Caso 5	Caso 7	Caso 9

## 2.5 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Se construye un modelo matemático a partir de las variaciones realizadas en la evaluación de parámetros. Dicho modelo correlaciona el diámetro promedio de las gotas en la emulsión formada, con los parámetros de entrada que han sido modificados previamente, es decir, la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana, pues estas son las variables de operación que se manipulan al momento de producir la emulsión.

Una vez obtenidos los resultados para cada caso estudiado se observa la dependencia del tamaño promedio de las gotas respecto a las variables de entrada y se evalúan varios modelos que permitan describir esa dependencia, seleccionando el mejor de acuerdo al coeficiente de regresión obtenido.

Finalmente se evalúa la efectividad de la correlación obtenida evaluando un caso específico con valores para la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana establecidos y comparando el valor arrojado por la correlación para el diámetro promedio de las gotas con el obtenido directamente a partir de la simulación.

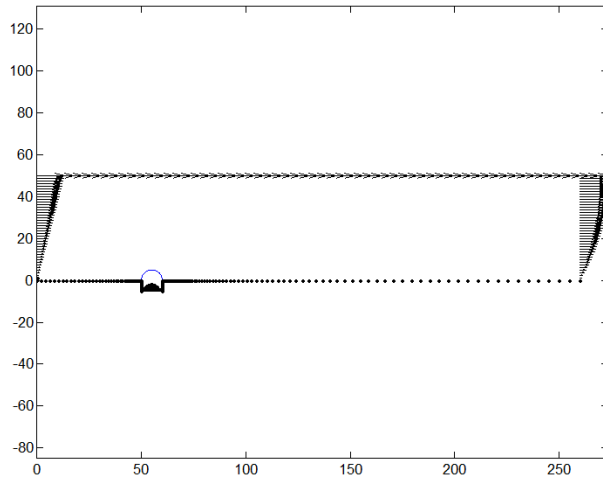
### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 3.1 OBSERVACIONES GENERALES

Se realiza inicialmente una simulación que se define como el caso base, a partir del cual se analizan todos los resultados obtenidos. Los valores iniciales para la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana son seleccionados teniendo en cuenta los estudios de Joscelyne y Trägardh, quienes reportan para membranas con un tamaño de poro de entre 0.2 y 10  $\mu\text{m}$  un rango de valores de 0.005 a 2.3 m/h para la velocidad de la fase continua y un rango de 20 a 500 kPa para la presión a través de la membrana (Joscelyne & Trägardh, 2000).

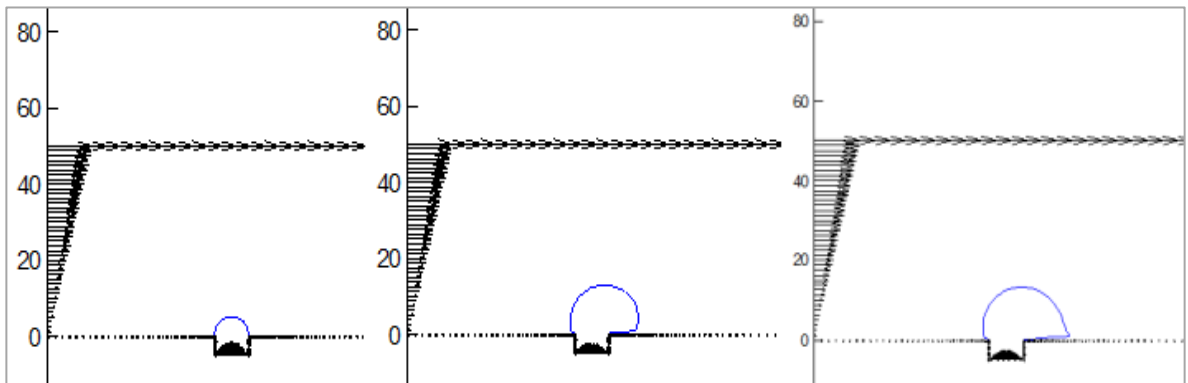
Se selecciona entonces un valor para la velocidad de la fase continua de 0.03 m/h, asegurando así que se tiene una velocidad que no es muy elevada, por lo que permite el crecimiento de las gotas, ya que el tamaño de éstas disminuye drásticamente con el aumento de la velocidad, y evita que haya un arrastre temprano de las mismas favoreciendo la formación correcta; y se selecciona un valor para la presión a través de la membrana de 150 kPa, con lo que se asegura una presión suficiente para lograr vencer el arrastre de la fase continua pero sin sobrepasar los límites que tienen los equipos necesarios para generar dicha presión. Estas condiciones de operación constituyen el caso base o caso 1.

En la Figura 6 se da cuenta de los primeros pasos en la simulación y se observa cómo se da inicio al paso de crudo a través de la membrana, estudiándose específicamente un poro de ésta y la formación de una gota de crudo sobre el mismo, para luego extrapolar los resultados a la totalidad de la membrana.



**Figura 6.** Caso 1 en  $t = 0$  s

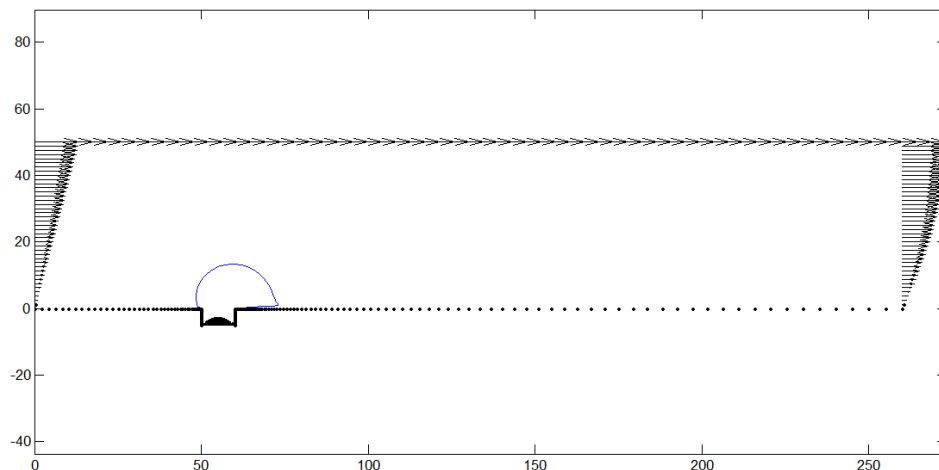
A partir de este paso de tiempo la superficie de la gota que se forma sobre el poro estudiado comienza a crecer, moviéndose a una mayor velocidad al inicio de la simulación y disminuyendo su velocidad para los pasos de tiempo posteriores; esto debido a que un flujo de entrada constante, que es con el que se cuenta en la simulación, creará un mayor movimiento en una superficie pequeña, mientras que el efecto de una superficie más grande inducirá a una velocidad superficial casi nula a medida que avanza la simulación. Este comportamiento puede observarse en la Figura 7 donde se expone el avance temporal de la simulación mostrando tres espacios de tiempo igualmente distantes: de izquierda a derecha  $t = 0$  s,  $t = 7000$  s y  $t = 14000$  s.



**Figura 7.** Caso 1 en  $t = 0$  s,  $t = 7000$  s y  $t = 14000$  s

En el tiempo de simulación  $t = 7000$  s se evidencia una gota con una forma casi esférica que se deforma a medida que avanza el tiempo, especialmente hacia el lado inferior derecho, lo que puede atribuirse a la interacción de las superficies de las paredes con la superficie de la gota y a la velocidad de la fase continua, ya que la presencia de la pared inferior no permite que la gota se mueva hacia abajo y la velocidad que lleva la fase continua empuja la gota precisamente en esa dirección. Sin embargo hacia el tiempo  $t = 14000$  s hay un detenimiento en el crecimiento de la gota central, que de aquí en adelante se nombrará como núcleo, pues a partir de ella empiezan a generarse las gotas que se desprenden y dan lugar a la emulsión crudo en agua deseada.

En la Figura 8 puede observarse independientemente, la simulación en el tiempo  $t = 14000$  s, donde el núcleo se encuentra completamente formado justo antes de que comience a tener lugar la formación de la primera gota a desprender, por lo que en este tiempo se establece el inicio de la formación de la gota.

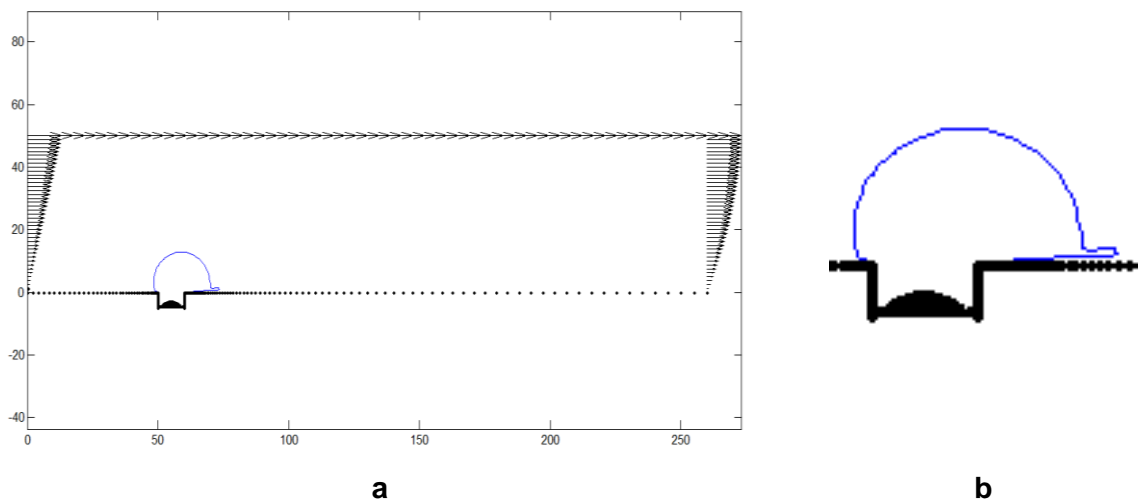


**Figura 8.** Caso 1 en  $t = 14000$  s

En la formación del núcleo incide fuertemente la presión a través de la membrana, ya que es gracias a ésta que el crudo logra vencer la resistencia de la membrana y empezar a formar una superficie sobre el poro, y en menor medida la velocidad de la fase continua que debe ser tal que evite el arrastre del núcleo antes de que esté se encuentre completamente formado. Una vez formado el núcleo la incidencia de la velocidad de la

fase continua aumenta, ya que debe ser suficiente para que puedan ser formadas gotas a partir del núcleo y posteriormente separadas del mismo con el fin de que se incorporen en el flujo y tenga lugar la emulsión.

Para este caso en el tiempo  $t = 24000$  s se tiene la primera gota completamente formada y a punto de desprenderse, lo cual se evidencia en el estrangulamiento del cuello que la une al núcleo como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.**(a) Caso 1 en  $t = 24000$  s.(b) Detalle de gota a desprender

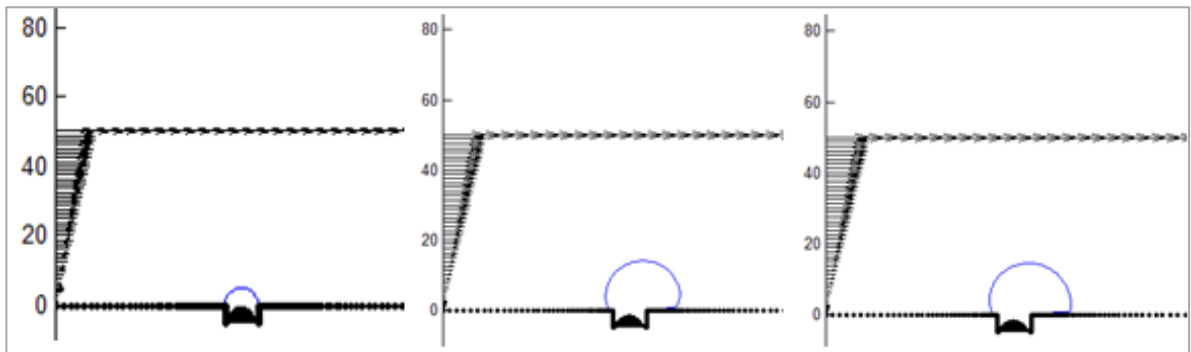
Posterior al desprendimiento de la primera gota se tiene de nuevo el núcleo preparado para dar lugar a la formación de las próximas gotas que producen la emulsión.

A partir de estos resultados se decide realizar variaciones en la velocidad de la fase continua, disminuyéndola e incrementándola, conservando el valor de la presión a través de la membrana utilizado para el caso 1.

Se realiza entonces una simulación utilizando un valor de 0.02 m/h para la velocidad de la fase continua y de 150 kPa para la presión a través de la membrana, constituyendo estas condiciones el caso 2.



Para estas condiciones, luego de dar inicio al paso de crudo a través de la membrana, es posible observar el mismo comportamiento de crecimiento rápido de la superficie de la gota al inicio de la simulación y su disminución para los pasos de tiempo posteriores, como se muestra en la Figura 10 donde se expone el avance temporal de la simulación mostrando tres espacios de tiempo igualmente distantes: de izquierda a derecha  $t = 0$  s,  $t = 10000$  s y  $t = 20000$  s.

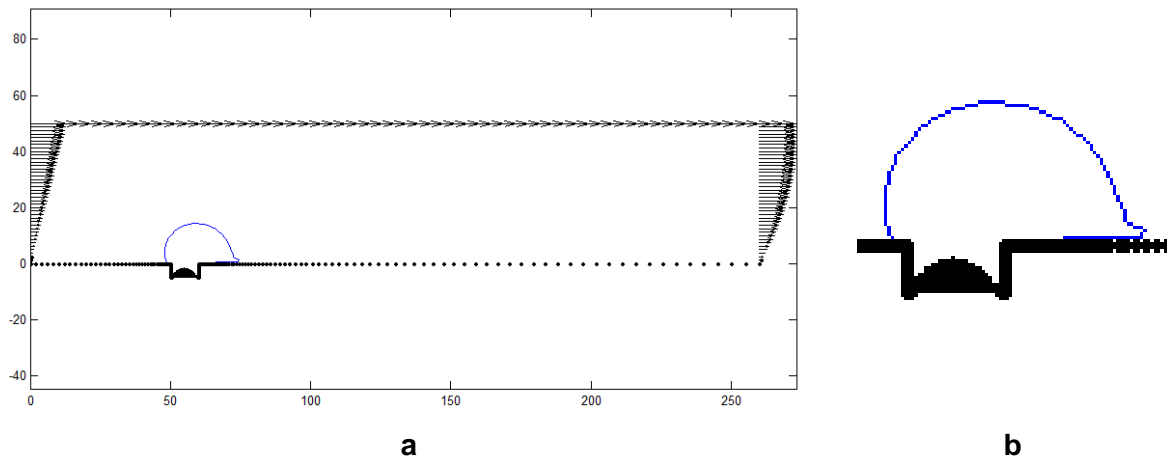


**Figura 10.** Caso 2 en  $t = 0$  s,  $t = 10000$  s y  $t = 20000$ s

En el tiempo de simulación  $t = 10000$  s se evidencia, como sucedía para el caso 1 en  $t = 7000$  s, una gota con forma casi esférica que se deforma a medida que avanza el tiempo, debido, como ya se expuso, a la interacción de las paredes con la gota y a la velocidad de la fase continua. Sin embargo, en el caso 2, al utilizar una velocidad menor, la gota tarda más en deformarse y dicha deformación ocurre en menor grado.

En este caso en el tiempo  $t = 20000$  s se detiene el crecimiento de la gota central y empieza a tener lugar la formación de la primera gota a desprender, lo que muestra que también la velocidad de la fase continua incide sobre la formación del núcleo, pues a pesar de que la presión a través de la membrana se mantuvo igual a la del caso 1, la formación del núcleo tomó más tiempo para el caso 2 debido a que la velocidad de la fase continua era menor.

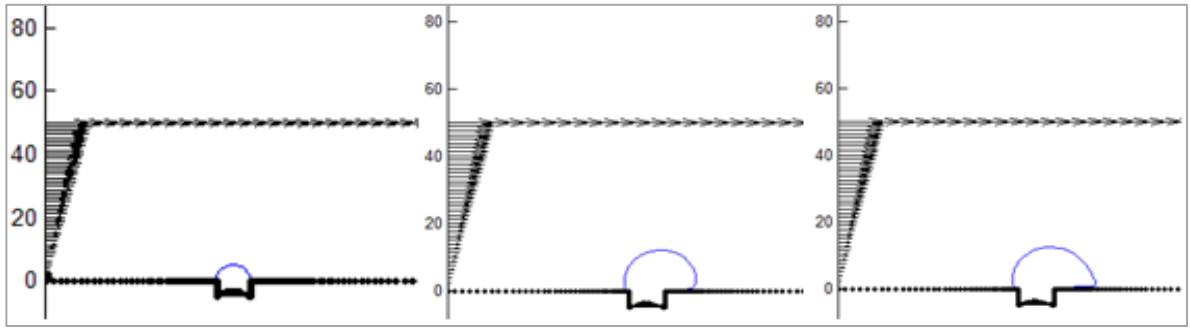
En cuanto a la formación de las gotas, la primera se da en  $t = 32000$  s, como se observa en la Figura 11; es decir, el proceso de formación de la emulsión para el caso 2 es más lento que para el caso 1, lo que demuestra la fuerte incidencia de la velocidad de la fase continua, que al disminuirse hace que se requiera un mayor tiempo para crear un movimiento sobre la superficie del núcleo que permita formar una gota y desprenderla; además en el detalle de la gota a desprender, Figura 11 (b), se evidencia que el tamaño de ésta es menor al de aquella generada cuando se opera con una velocidad de fase continua mayor.



**Figura 11.** (a) Caso 2 en  $t = 32000$  s. (b) Detalle de gota a desprender

Se continúa con la variación de parámetros propuesta, simulando el caso 3 bajo las siguientes condiciones: velocidad de la fase continua de 0.04 m/h y presión a través de la membrana de 150 kPa

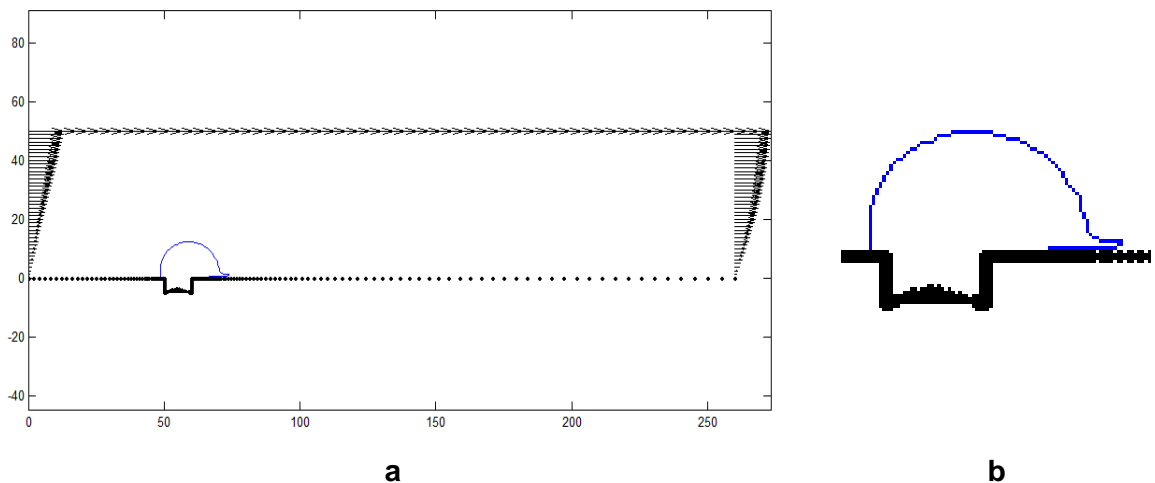
Para este caso, una vez más, se registra un crecimiento en la superficie de la gota a una mayor velocidad al inicio de la simulación y una disminución de la misma hasta presentar una velocidad superficial casi nula a medida que avanza el tiempo de simulación, lo que se observa en la Figura 12 donde se muestra el avance de la simulación en tres espacios de tiempo:  $t = 0$  s,  $t = 5000$  s y  $t = 10000$  s.



**Figura 12.** Caso 3 en  $t = 0$  s,  $t = 5000$  s y  $t = 10000$  s

Para este caso, igual que para los anteriores, se presenta una superficie esférica que se deforma con el avance del tiempo, debido a las fuerzas a las que se ve sometida; sin embargo para este caso la superficie esférica se presenta alrededor de un tiempo  $t = 5000$  s y su crecimiento se detiene en un tiempo  $t = 10000$  s, lo que representa la mitad del tiempo transcurrido cuando la velocidad de la fase continua era de  $0.02$  m/h, esto significa que hay una relación inversamente proporcional entre la velocidad de la fase continua y el tiempo de formación del núcleo, ya que al duplicarse la velocidad, manteniendo la presión a través de la membrana, este tiempo se redujo a la mitad.

El tiempo en que se detiene el crecimiento del núcleo se define como el tiempo de inicio de la formación de las gotas, por lo que en este caso la primera gota empieza a formarse en un tiempo  $t = 10000$  s y se encuentra completamente formada y lista para desprenderse en un tiempo  $t = 18000$  s, como se observa en la Figura 13.



**Figura 13.** (a) Caso 3 en  $t = 18000$  s. (b) Detalle de gota a desprender

Ese tiempo que transcurre entre la formación completa del núcleo, y la formación y desprendimiento de la primera gota, confirma la fuerte incidencia de la velocidad de la fase continua sobre la tasa de producción de la emulsión, ya que al aumentarse la velocidad se requiere un menor tiempo para crear un movimiento sobre la superficie y que se dé la formación de las gotas, además de que se logra generar gotas de mayor tamaño que aquellas formadas en los casos 1 y 2 como puede observarse en el detalle de la gota a desprender en la Figura 13 (b).

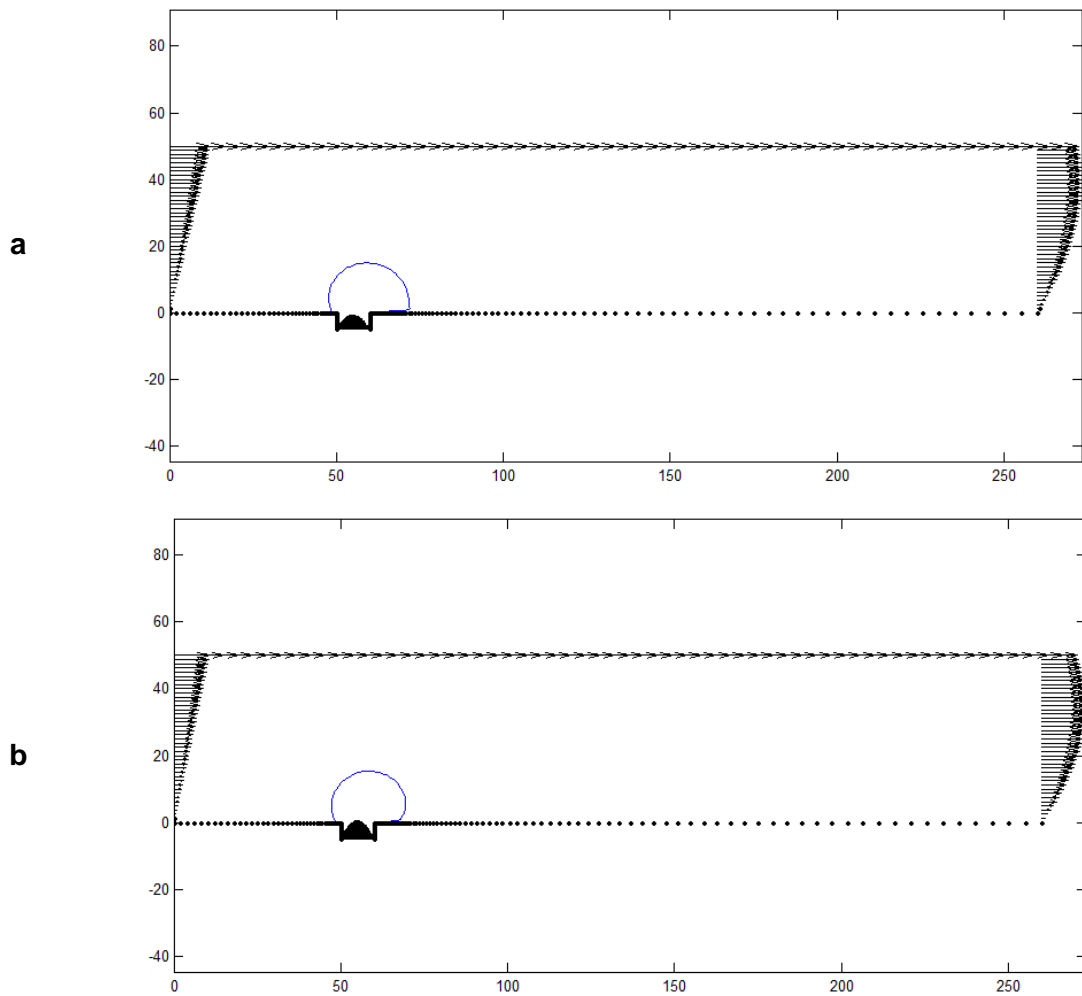
Frente a estos resultados se decide evaluar variaciones en la presión a través de la membrana conservando los valores para la velocidad de la fase continua que ya han sido empleados.

Se procede entonces a evaluar cambios en la presión manteniendo una velocidad de 0.02 m/h, realizando simulaciones con una presión a través de la membrana de 200 y 300 kPa.

Para ambos casos de nuevo se observa un crecimiento de la superficie de la gota a una mayor velocidad al inicio y que disminuye para pasos de tiempo posteriores, atribuido al efecto de la superficie, que al ser más grande induce a que la velocidad superficial tienda a ser casi nula a medida que avanza la simulación.

Particularmente para estos dos casos el crecimiento de la gota se ve estancado debido a que la velocidad de la fase continua no es suficiente para crear movimiento sobre la superficie del núcleo con el fin de formar las pequeñas gotas que constituyen la emulsión, y mucho menos para lograr un desprendimiento, debido a que se ve enfrentada a presiones de inyección a través de la membrana más elevadas que la estudiada inicialmente; es decir, una velocidad para la fase continua de 0.02 m/h no es suficiente para vencer presiones a través de la membrana de 200 y 300 kPa y lograr un arrastre el núcleo que dé lugar a la formación de las gotas.

Lo anteriormente descrito se puede ver evidenciado en la Figura 14, donde se puede observar que para el caso 4: velocidad de 0.02 m/h y presión de 200 kPa, y para el caso 5: velocidad de 0.02 m/h y presión de 300 kPa, una vez transcurridos 60000 s y 30000 s respectivamente, aún no ha tenido inicio la formación de la primera gota a desprender.

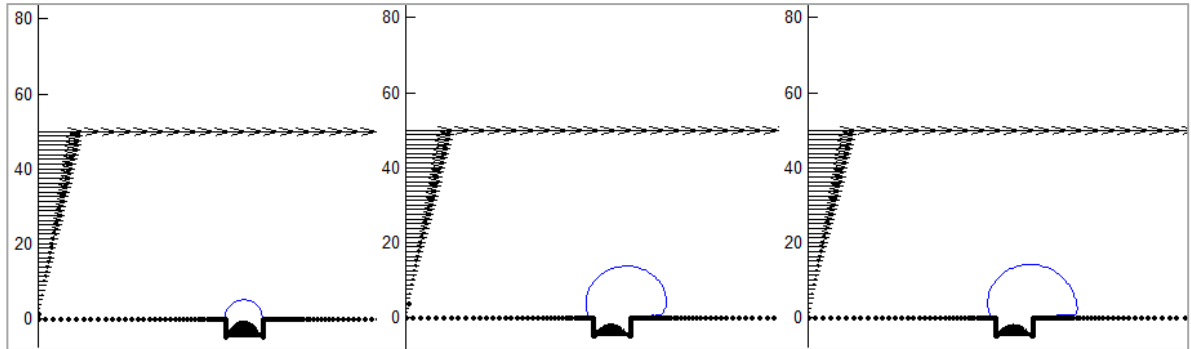


**Figura 14.** (a) Caso 4 en  $t = 40000$  s. (b) Caso 5 en  $t = 30000$  s

Se pasa entonces a evaluar cambios en la presión a través de la membrana para una velocidad de la fase continua de  $0.03$  m/h, de nuevo para presiones a través de la membrana de  $200$  y  $300$  kPa. Estos dos casos se denominan caso 6 y caso 7 respectivamente.

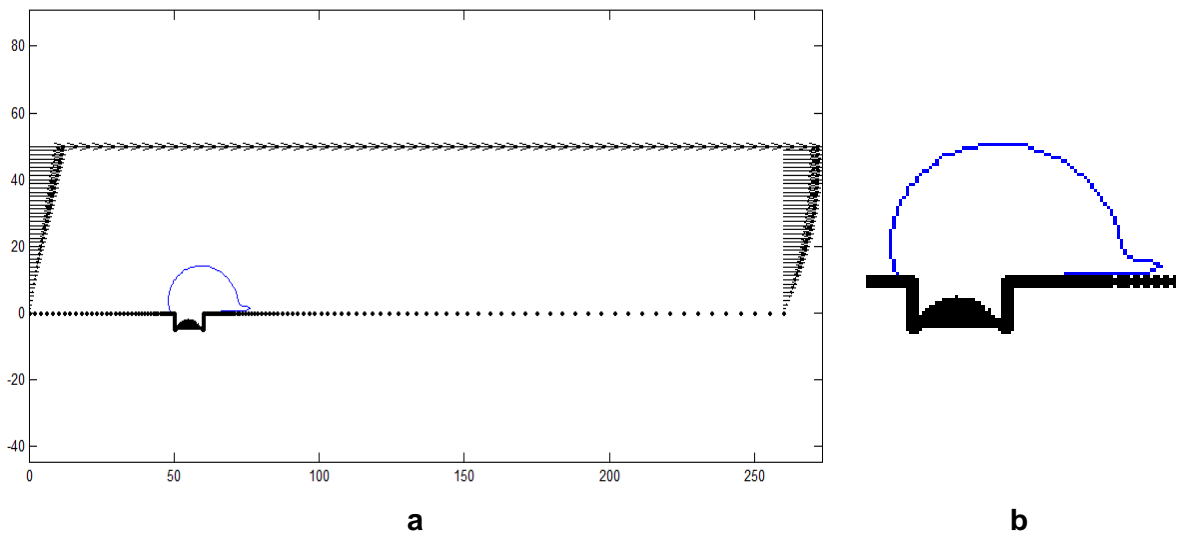
A partir del caso 6 se puede inferir la importancia de las variables de velocidad de la fase continua y presión a través de la membrana de forma conjunta, pues es la combinación de estas variables la que determina el tiempo requerido para que se dé la formación del núcleo, la tasa de producción de la emulsión o tiempo requerido para la formación de cada gota que constituye la emulsión y el tamaño final de las gotas obtenidas.

Para este caso, nuevamente, la superficie de la gota crece a una mayor velocidad inicialmente y ésta va disminuyendo mientras avanza el tiempo en la simulación, como se muestra en la Figura 15 para la simulación en tres espacios de tiempo igualmente distanciados:  $t = 0$  s,  $t = 6500$  s y  $t = 13000$  s.



**Figura 15.** Caso 6 en  $t = 0$  s,  $t = 6500$  s y  $t = 13000$  s

Tal como sucede en todos los casos anteriores, la interacción de la superficie de la gota con la superficie de las paredes y la velocidad de la fase continua genera que ésta se deforme debido al arrastre al que se ve sometida y el impedimento que tiene de expandir su superficie en determinada dirección. En este caso, se obtiene la misma tasa de producción que para el caso 1, pues se opera a la misma velocidad de la fase continua, pero la formación completa de la gota se da primero en el caso 6 al operar bajo una presión mayor. La gota se presenta completamente formada en el tiempo  $t = 23000$  s como se observa en la Figura 16.

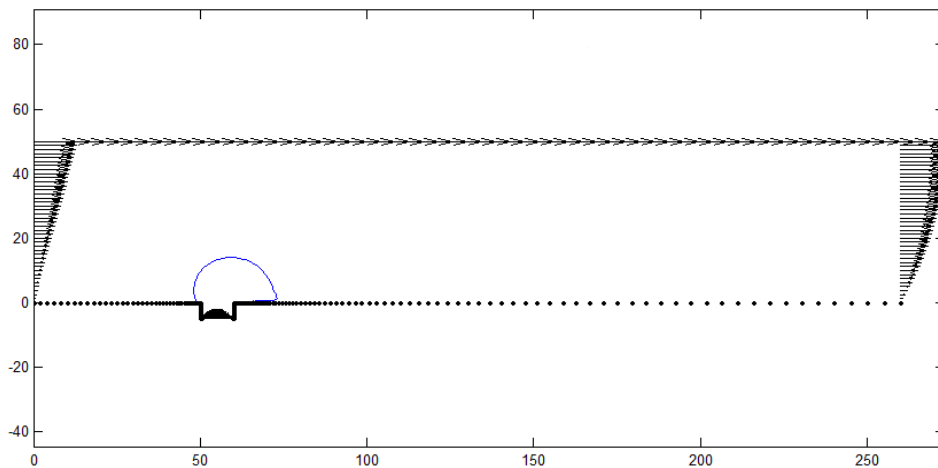


**Figura 16.** (a) Caso 6 en  $t = 23000$  s. (b) Detalle de gota a desprender

Para el caso 7, 300 kPa y 0.03 m/h, se repite el comportamiento observado para los casos 4 y 5; desde el cambio en la velocidad de crecimiento de la superficie hasta el estancamiento del crecimiento del núcleo, y de igual forma no hay producción de gotas que constituyan la emulsión crudo en agua deseada.

A pesar de trabajar con el mismo valor de velocidad para la fase continua utilizado en el caso 1, 0.03 m/h, ésta no es suficiente para lograr un movimiento de la superficie, pues no representa un valor significativo respecto a la presión tan alta que se está utilizando para inyectar el crudo, el doble de la presión trabajada en el caso base (caso 1).

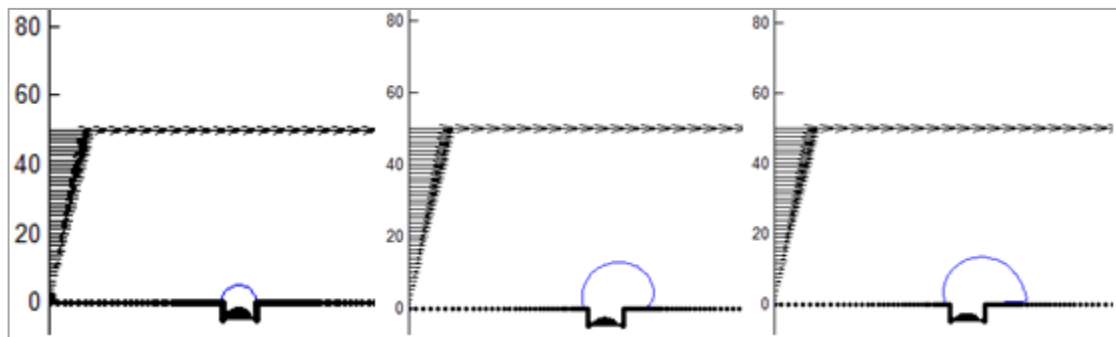
El comportamiento descrito en el caso 7 se muestra en la Figura 17, donde se observa como luego de transcurridos 40000 s, aún no ha iniciado la formación de la primera gota.



**Figura 17.** Caso 7 en  $t = 40000$  s

Se procede entonces a evaluar los valores para la presión a través de la membrana de 200 y 300 kPa para una velocidad de la fase continua de 0.04 m/h, constituyendo estos los casos 8 y 9 respectivamente.

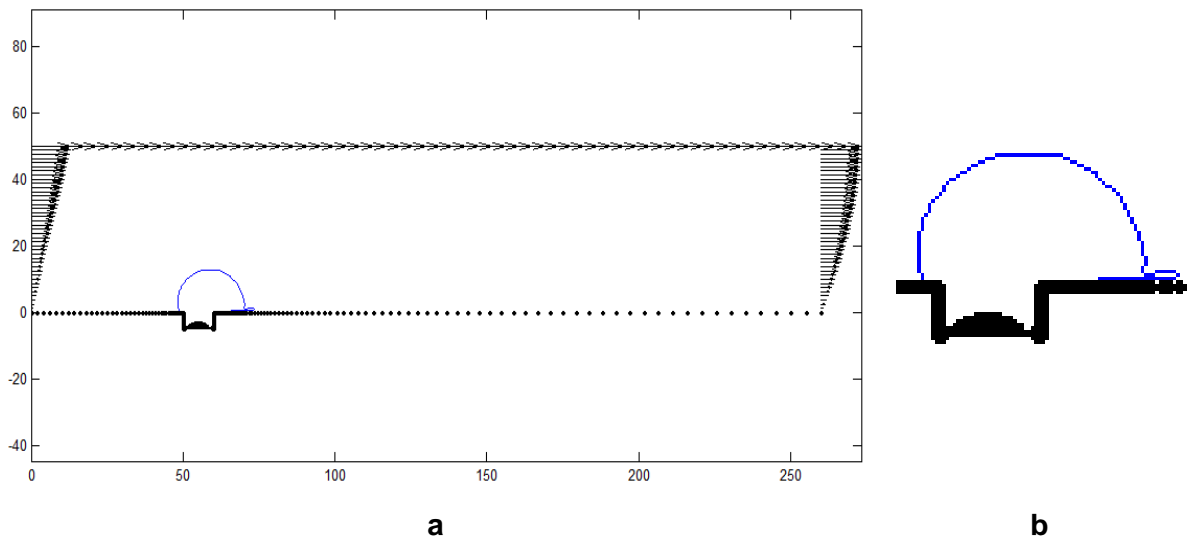
Para estos casos los comportamientos anteriormente descritos respecto a la forma en que se da el crecimiento de la superficie y los factores que afectan la misma se repite como se puede observar para el caso 8 en la Figura 18.



**Figura 18.** Caso 8 en  $t = 0$  s,  $t = 4500$  s y  $t = 9000$  s

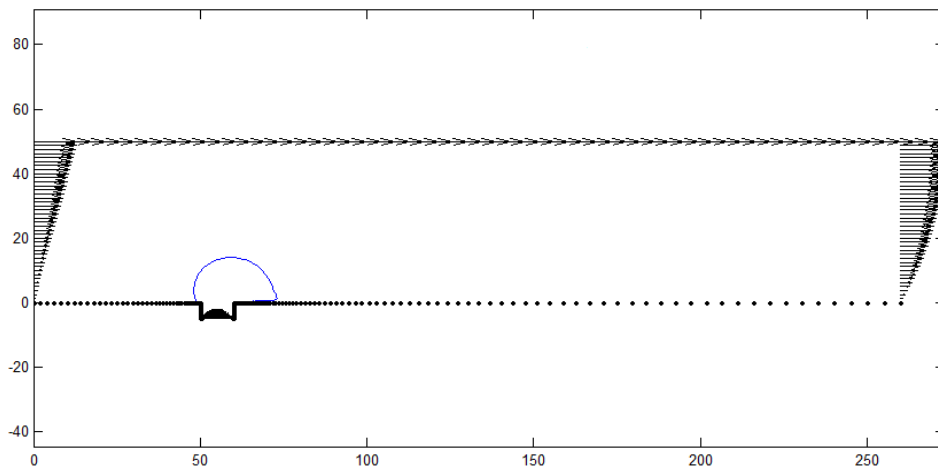


Además de esto, a partir de estos resultados, es posible ver con claridad la fuerte influencia de la velocidad de la fase continua sobre la tasa de producción de la emulsión, pues si se compara el caso 8 con el caso 3, donde la velocidad es la misma y se emplean presiones a través de la membrana diferentes, la primera gota tarda el mismo tiempo en formarse y desprenderse en ambos casos; es decir, se tiene la misma tasa de producción pero la formación de la gota se da primero en el caso 8 debido a que se emplea una presión a través de la membrana mayor a la del caso 3. Este comportamiento se observa en la Figura 19.



**Figura 19.** (a) Caso 8 en  $t = 17000$  s. (b) Detalle de gota a desprender

Para el caso 9 se repite la situación presentada en los casos 4, 5, y 7 donde la velocidad de la fase continua no es suficiente para lograr un movimiento de la superficie del núcleo que se forma gracias a la presión inyectada, que al ser más elevada genera un proceso de llenado y no de formación de emulsión. Para este caso se observa en la Figura 20 cómo en el tiempo  $t = 40000$  s aún no ha tenido lugar la formación de la primera gota de crudo.



**Figura 20.** Caso 9 en  $t = 40000$  s

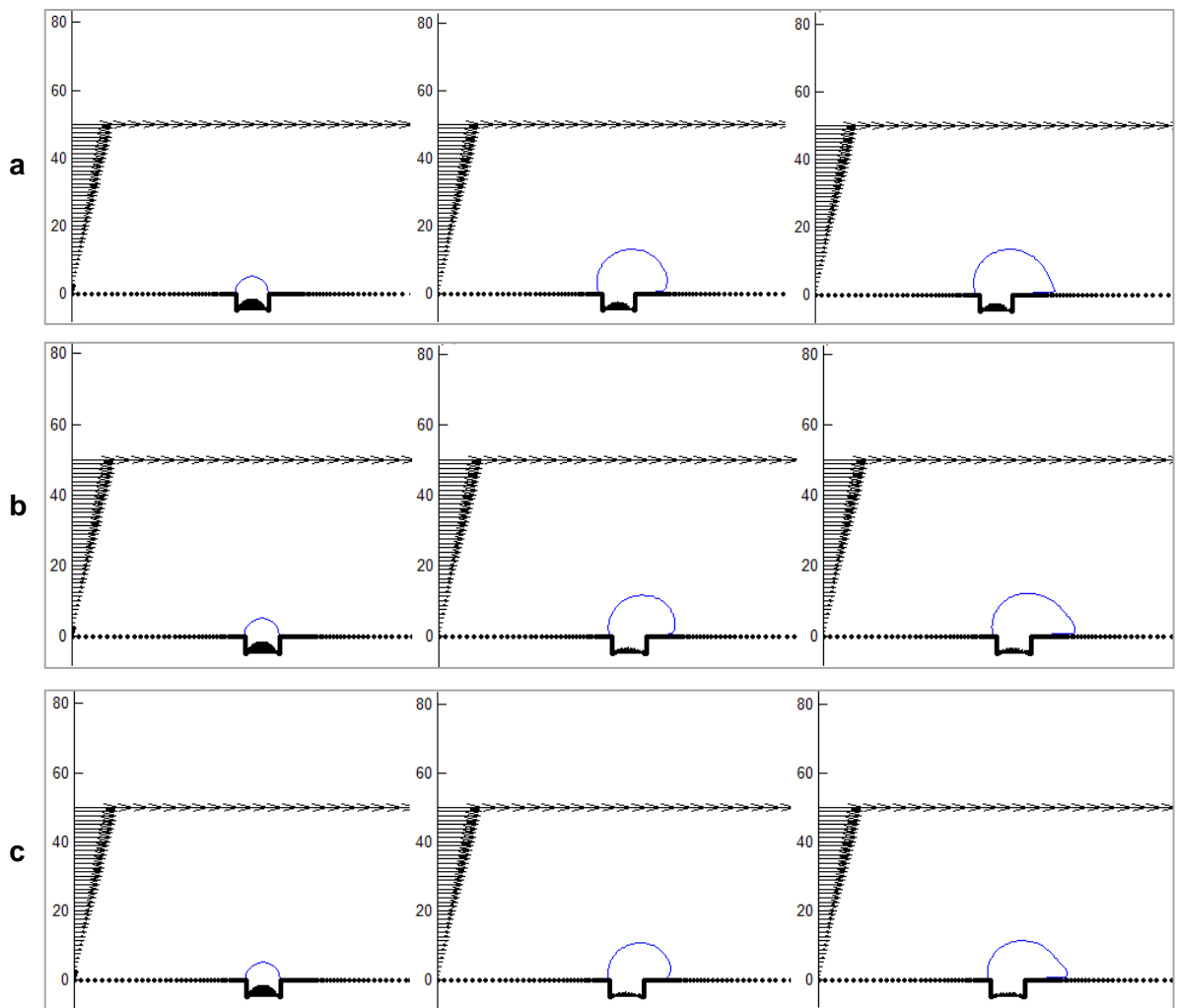
Las fuerzas que actúan sobre la gota pueden dividirse convenientemente en de dirección paralela o de dirección perpendicular respecto a la superficie de la membrana, considerándose como los mayores contribuyentes al desprendimiento de la gota la fuerza de arrastre creada por la fase continua y el levantamiento originado por la presión a través de la membrana y su distribución sobre la gota que se está formando; de esta manera puede darse explicación al fenómeno presentado en los casos 4, 5, 7 y 9 (De Luca, Di Maio, Di Renzo, & Drioli, 2008).

En estos casos la velocidad de la fase continua es muy baja respecto a la presión con la cual es inyectado el crudo, por lo que se observa una deformación en el núcleo pero no es posible generar un movimiento de la superficie de éste que dé lugar a la formación de una gota, ya que, sumado a la baja velocidad que lleva la fase continua, la presión a través de la membrana empieza a distribuirse de una forma más uniforme sobre la superficie del núcleo que se ha formado y la fuerza no se concentra sobre el lugar donde se originan las gotas, dificultando su formación y desprendimiento (Timgren, Trägradh, & Trägradh, 2010).

Determinar la relación óptima entre la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana que asegure el desprendimiento de las gotas se hace difícil debido a que esta depende de la relación entre las diferentes propiedades físicas de los fluidos (Vladisavljevic, y otros, 2013), por lo que se opta por continuar evaluando, de acuerdo a

los estudios de Joscelyne y Trägårdh, diferentes combinaciones para las variables operacionales de velocidad y presión (Joscelyne & Trägårdh, 2000).

Se decide entonces evaluar una presión de 100 kPa junto con los valores para la velocidad de la fase continua ya definidos de 0.02, 0.03 y 0.04 m/h constituyendo los casos 10, 11 y 12 respectivamente. Lo anterior con el fin de tener resultados suficientes para la elaboración de un modelo matemático.

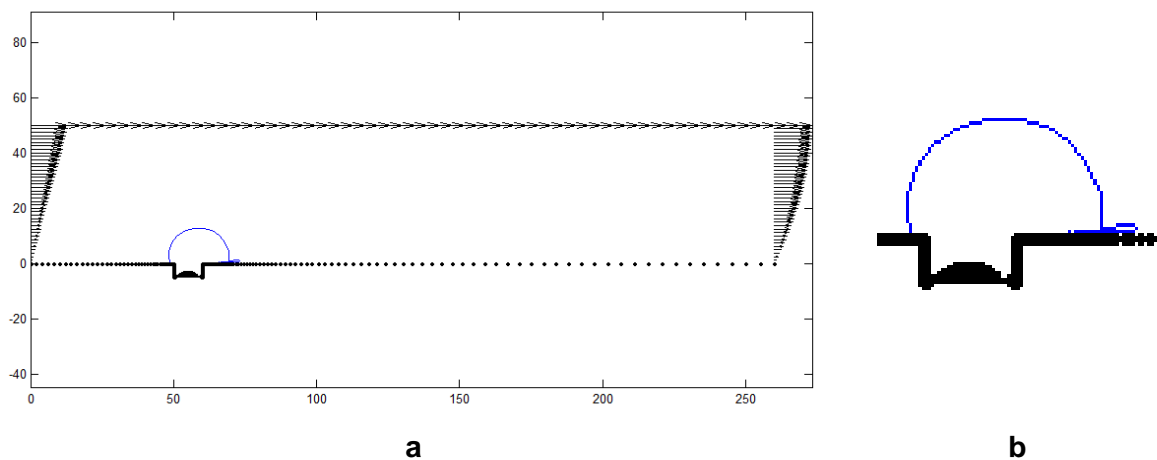


**Figura 21.** (a) Caso 10 en  $t = 0$  s,  $t = 12500$  s y  $t = 25000$  s. (b) Caso 11 en  $t = 0$  s,  $t = 6500$  s y  $t = 13000$  s. (c) Caso 12 en  $t = 0$  s,  $t = 4500$  s y  $t = 9000$  s

Para estos casos el comportamiento observado durante la formación del núcleo es el mismo descrito en los casos anteriores. La velocidad con la que crece la superficie de la gota disminuye a medida que avanza la simulación debido al aumento en el tamaño en la superficie y la dificultad que conlleva desplazar una superficie mayor empleando una misma velocidad. De la misma manera se observa también la deformación propia de la gota debido a la interacción de la misma con la superficie de las paredes y la influencia de la velocidad de la fase continua. Lo descrito puede observarse, para los tres casos con presión a través de la membrana de 10 kPa, en la Figura 21.

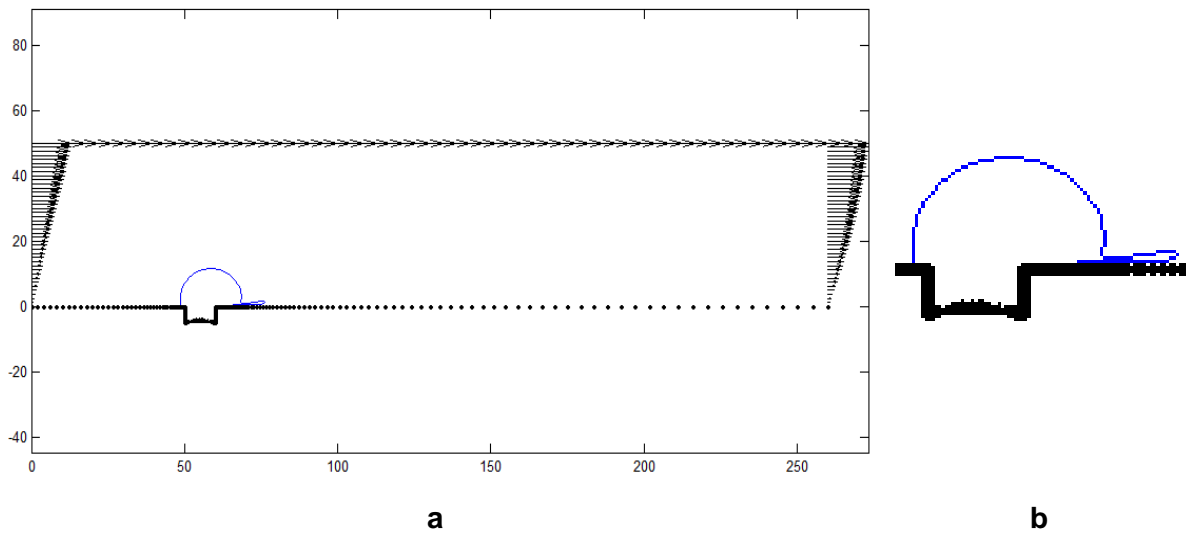
En el caso 10 la formación de la gota tarda más tiempo comparado con el caso 2 que emplea la misma velocidad de fase continua, esto debido a que se emplea una presión menor, que combinada con la baja velocidad, lleva a que se requiera un mayor tiempo para formar y desprender la gota.

Esto confirma que el tiempo requerido para que se dé la formación del núcleo, la tasa de producción de la emulsión y el tiempo requerido para la formación de cada gota dependen de la relación entre las variables de velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana pues de éstas depende la fuerza de arrastre y la de levantamiento de la superficie respectivamente. En este caso el núcleo se encuentra totalmente formado en un tiempo  $t = 25000$  s y la primera gota se presenta completamente formada y lista para desprenderse en un tiempo  $t = 41000$  s como se observa en la Figura 22.

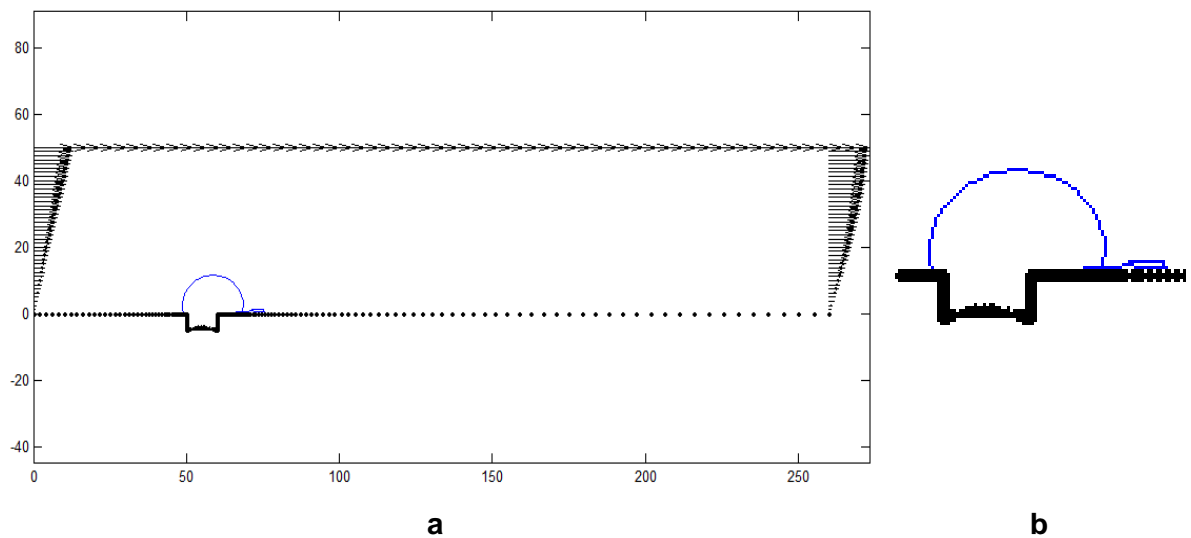


**Figura 22.** (a) Caso 10 en  $t = 41000$  s. (b) Detalle de gota a desprender

En los casos 11 y 12 al haber un aumento en la velocidad de la fase continua, tanto el tiempo requerido para que se dé la formación del núcleo como el tiempo requerido para la formación de cada gota disminuyen, presentándose la primera gota completamente formada y lista para su desprendimiento en  $t = 28000$  s para el caso 11 y en  $t = 23000$  s para el caso 12 como se observa en las Figura 23 y Figura 24 respectivamente.



**Figura 23.** (a) Caso 11 en  $t = 28000$  s. (b) Detalle de gota a desprender



**Figura 24.** (a) Caso 12 en  $t = 23000$  s. (b) Detalle de gota a desprender

Estos resultados, permiten una vez más observar la influencia de la velocidad de la fase continua sobre la tasa de producción de la emulsión, pues al aumentar la velocidad manteniendo la misma presión se observa una mayor rapidez en la formación de las gotas y por tanto en la producción de la emulsión.

Además de esto, si se compara el caso 11 con los casos 1 y 6 y el caso 12 con los casos 3 y 8, donde, para cada conjunto de casos comparados, la velocidad es la misma y se emplean presiones a través de la membrana diferentes, se observa que el tiempo requerido para la formación y desprendimiento de las gotas es menor cuando se incrementa la presión de 100 a 150 kPa, pero se mantiene cuando la presión se incrementa de 150 a 200 kPa, debido a que esta presión, al ser más elevada, empieza a distribuirse de una forma más uniforme sobre la superficie del núcleo y representa una fuerza que dificulta el arrastre que proporciona la velocidad de la fase continua (Timgren, Trägårdh, & Trägårdh, 2010).

### **3.2 TAMAÑO PROMEDIO DE LAS GOTAS**

Para obtener el diámetro promedio de las gotas se realiza una integración numérica sobre los puntos que representan el área limitada por la gráfica que describe la gota, dicha integración se realiza empleando el método de la regla de Simpson 1/3, pues representa una mejor aproximación que la obtenida utilizando un método como la regla del trapecio conservando simplicidad. De esta manera se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Diámetro promedio de las gotas ( $\mu\text{m}$ )

Presión a través de la membrana (kPa)	Velocidad de la fase continua (m/h)		
	0.02	0.03	0.04
100	1.47	1.64	1.96
150	1.13	1.52	1.73
200	-	1.50	1.55
300	-	-	-

De acuerdo a Hasan et al. la emulsificación empleando membranas microporosas permite la producción de una fase monodispersa que presenta un tamaño de gota promedio entre 0.1 y 10  $\mu\text{m}$  (Hasan, Ghannam, & Esmail, 2010), lo cual se cumple para las emulsiones formadas bajo todas las condiciones de operación estudiadas, pues se obtienen diámetros promedios para las gotas que van desde 1.13  $\mu\text{m}$  hasta 1.96  $\mu\text{m}$ .

Estos valores se encuentran entre los más pequeños del rango presentado por los autores mencionados, esto principalmente debido a la fuerza interfacial, que es uno de los parámetros fijos y tiene un valor de 3.4 mN/m, ya que ésta es una de las fuerzas esenciales que sujeta la gota al poro, como lo describen Schröder et al.; por lo que en los casos estudiados, al tenerse una tensión interfacial baja, se producen gotas de un menor tamaño, y se producirán gotas más grandes cuanto mayor sea la tensión interfacial del equilibrio (Schröder, Schubert, & Behrend, 1998).

Otra característica a resaltar es la distribución de tamaño de las gotas, donde todos los casos estudiados presentan la formación de emulsiones que muestran una fase que podría considerarse monodispersa, pues no hay grandes variaciones en el diámetro de las gotas que las conforman y se pueden ubicar dentro de la distribución conocida como Rosin - Rammler, que se encuentra entre 0.5 y 1.8  $\mu\text{m}$ .

Esta distribución de tamaño de las gotas permite obtener una emulsión que es estable durante un periodo mayor de tiempo, comparado con la estabilidad de las emulsiones formadas utilizando otros métodos como lo han indicado investigaciones como la de

Laurencio y Delgado sobre las propiedades reológicas de las emulsiones de petróleo pesado en agua (Laurencio Alfonso & Delgado Drubey, 2007).

En adición, las emulsiones realizadas empleando instrumentos como los molinos coloidales, los discos dentados, las máquinas dispersantes y los homogenizadores de alta presión muestran además una considerable polidispersidad con distribuciones de tamaño de las gotas que se encuentran usualmente entre 0.1 y 100  $\mu\text{m}$ , lo que contribuye a la inestabilidad de la emulsión presentando problemas de coalescencia y/o agregación (Nakashima, Shimizu, & Kukizaki, 1991).

### **3.3 TASA DE PRODUCCIÓN DE LA EMULSIÓN**

La tasa de producción se determina utilizando el tiempo transcurrido entre el momento en que se detiene el crecimiento del núcleo y aquel en el que se forma completamente y se desprende la primera gota de crudo.

De esta forma es posible encontrar la tasa de producción de un poro de la membrana, por lo cual se hace necesario extrapolar los resultados obtenidos para determinar la tasa de producción de la emulsión para una membrana microporosa típica en este tipo de aplicaciones. Para esto se selecciona una membrana microporosa que permita el paso de crudo suficiente para generar aproximadamente 1  $\text{m}^3$  de emulsión y con un tamaño de poro de 10  $\mu\text{m}$ . De acuerdo a la publicación de Egidi et al, teniendo una distancia entre poros de 80  $\mu\text{m}$  con el fin de evitar fenómenos de choque entre las gotas y posterior coalescencia, el número de poros en una membrana es aproximadamente 350.000 poros/ $\text{cm}^2$  (Egidi, Gasparini, Holdich, Vladislavljevic, & Kosvintsev, 2008).

Se obtienen entonces resultados para la tasa de producción en unidades de gotas/h y se realiza una aproximación de un contenido de 20 gotas en 1 ml para presentar los resultados en unidades más significativas como se muestra en la Tabla 6.



**Tabla 6.** Tasa de producción de la emulsión (l/h)

Presión a través de la membrana (kPa)	Velocidad de la fase continua (m/h)		
	0.02	0.03	0.04
100	895.5	938.1	1010.3
150	1193.9	1407.1	1790.9
200	-	1407.1	1790.9
300	-	-	-

Tal y como se observa en los resultados, la tasa de producción es principalmente función de la velocidad de la fase continua, a medida que sea mayor la velocidad de la fase continua, mayor será la tasa de producción debido a que hay una fuerza de arrastre sobre el núcleo más significativa y por ende, se facilita la formación y desprendimiento de la gota.

Sin embargo no se puede dejar de tener en cuenta la relación que existe entre las variables de velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana, las fuerzas que crean cada una y como su interacción combinada es la que determina finalmente la velocidad en la formación y desprendimiento de las gotas y por tanto la tasa de producción de la emulsión (Vladisavljevic, y otros, 2013).

De modo que en el caso de la formación de emulsiones empleando membranas microporosas, al elevar la presión a través de la membrana y la velocidad de la fase continua, hay una tendencia hacia el aumento de la tasa de producción; mientras que cuando son empleados métodos tradicionales, a medida que se incrementa la velocidad de agitación para lograr gotas de un menor tamaño en aras de mejorar la estabilidad, se termina por sacrificar la tasa de producción pues ésta disminuye de manera significativa (Nakashima, Shimizu, & Kukizaki, 1991).

### 3.4 CONSUMO ENERGÉTICO

Para calcular la potencia requerida para producir  $1 \text{ m}^3$  de emulsión utilizando una membrana microporosa, se parte de la diferencia de presión a través de la membrana y el caudal de la fase dispersa; éste último se determina a partir de los perfiles de velocidad para dicha fase en cada paso de tiempo, entregados por la simulación.

En la Tabla 7 se muestran los resultados de potencia requerida analizando únicamente un poro de la membrana.

**Tabla 7.** Potencia W/poro requerida para diferentes caídas de presión

Presión a través de la membrana (kPa)	Velocidad de la fase continua (m/h)		
	0.02	0.03	0.04
100	3.60E-15	3.64E-15	4.27E-15
150	8.32E-15	8.36E-15	8.32E-15
200	-	1.48E-14	1.47E-14
300	-	-	-

Como se puede apreciar, bajo las condiciones evaluadas la potencia no presenta una dependencia fuerte de la velocidad de la fase continua debido a que hace referencia al trabajo requerido para generar las diferencias de presión en la inyección del crudo a través de la membrana y no es una variable directamente implicada con la fase continua; es por esta razón que para un mismo valor de presión la potencia es casi igual para todas las velocidades de la fase continua que se evaluaron.

De igual forma, es de esperarse que se requiera mayor potencia para generar una diferencia de presión de 200 kPa con respecto a una de 150 kPa y al mismo tiempo que se requiera mayor potencia para una diferencia de presión de 150 kPa con respecto a una

de 100 kPa, debido a que es necesario emplear mayores cantidades de energía en el movimiento del fluido para generar dichos gradientes de presión.

Una vez evaluada la potencia, se procede a analizar los costos energéticos de producción de 1m<sup>3</sup> de emulsión utilizando membranas microporosas con respecto a los métodos tradicionales. Empleando los valores de potencia calculados y teniendo en cuenta un costo aproximado de \$350/kW·h para la industria colombiana (Ramírez, Ávila, & Aguilar, 2012), se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 8.

Para realizar la comparación entre métodos en primer lugar se determina el costo de producción de 1 m<sup>3</sup> de emulsión utilizando un sistema rotor de alta cizalladura. Utilizando la potencia y capacidad de éste equipo reportada por el fabricante (SieHeMechanical and Electrical), se obtiene un costo de \$427/m<sup>3</sup>.

**Tabla 8.** Costos de producción de 1 m<sup>3</sup> de emulsión empleando membranas microporosas

Potencia (W/poro)	Costo de producción con membranas	%Reducción de costos
3.60E-15	\$ 9.72	97.7%
8.32E-15	\$ 14.58	96.6%
1.48E-14	\$ 19.44	95.4%

Teniendo en cuenta que los costos de producción están directamente relacionados con la potencia requerida para generar la caída de presión en la membrana, es de esperarse que se tenga un menor costo de producción para una presión de 100 kPa debido a que se requiere menor potencia.

Los costos de producción con membranas que se obtienen en éste trabajo, se ajustan a los costos mencionados por Joscelyne & Trägardh en su investigación sobre emulsificación con membranas, donde utilizando el precio del kilowatio-hora para la industria colombiana, se obtienen para este método valores alrededor de \$8/m<sup>3</sup> (Joscelyne & Trägardh, 2000).

En cuanto al costo de producción utilizando métodos tradicionales, es mayor con respecto al costo empleando membranas, debido a que en los sistemas que utilizan fuertes tensiones de cizallamiento solo una fracción de la energía suministrada se utiliza en el rompimiento de las gotas, y hasta el 99.8% de la energía se pierde en forma de calor (Perez Marzulli, Cardenas, & Bullon, 2010).

Finalmente, cabe resaltar que para todos los requerimientos de potencia estudiados, se presenta una reducción de costos superior al 90% empleando membranas, lo cual es una ventaja notoria que lleva a éste método a ser una opción de gran interés para la formación de emulsiones.

### 3.5 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático se obtiene a partir de una regresión, con el fin de encontrar una expresión que permita relacionar el diámetro promedio de las gotas obtenidas dentro de una emulsión, de acuerdo a las variables de operación de velocidad de la fase continua y presión a través de la membrana.

Se evalúan dos correlaciones propuestas con el fin de determinar cuál de estas describe mejor el comportamiento del proceso de formación de emulsiones crudo en agua bajo las características estudiadas. Los modelos evaluados son los siguientes:

$$d = a \cdot P + b \cdot F + c \quad (7)$$

$$d = a \cdot P + b \cdot F^2 + c \quad (8)$$

Donde  $d$  es el diámetro promedio de las gotas en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ),  $P$  es la presión a través de la membrana en kilopascales (kPa), y  $F$  es la velocidad de la fase continua en metros por hora (m/h). Los coeficientes obtenidos para las correlaciones seleccionadas se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Coeficientes obtenidos para correlacionar el diámetro promedio de las gotas

<b>Coeficiente</b>	<b>Modelo lineal</b>	<b>Modelo cuadrático</b>
a	-0.0031	-0.0029
b	25.63	408.62
c	1.2013	1.5620
R <sup>2</sup>	0.88	0.85

Estas correlaciones indican que la dependencia del tamaño promedio de las gotas en la emulsión formada respecto a la velocidad de la fase continua es directa; mientras que respecto a la presión a través de la membrana es inversa, lo que indica que el diámetro de las gotas de crudo en la emulsión aumenta cuando se aumenta la velocidad de la fase continua y disminuye cuando lo que se aumenta es la presión a través de la membrana.

Para cada una de las correlaciones también se obtiene el coeficiente de regresión como se muestra en la Tabla 9, esto con el fin de determinar cuál describe mejor el comportamiento estudiado, por lo que se selecciona el modelo lineal, ya que a pesar de que el coeficiente que presenta es inferior a 0.90, éste es mayor que aquel obtenido para el modelo cuadrático. Los valores obtenidos para los coeficientes de regresión se pueden justificar debido a la diferencia de magnitud entre las variables de velocidad de la fase continua y presión a través de la membrana, lo que dificulta encontrar coeficientes que describan el comportamiento de una forma ajustada, además de que se están proponiendo modelos sencillos. El modelo matemático seleccionado es entonces el siguiente.

$$d = -0.0031 P + 25.63 F + 1.2013 \quad (11)$$

Para verificar la correlación obtenida se calcula a partir de ésta el valor del diámetro promedio de las gotas para una emulsión bajo condiciones de velocidad de la fase continua de 0.035 m/h y presión a través de la membrana de 170 kPa; a la vez que se simula la formación de la emulsión bajo dichas condiciones y se encuentra el diámetro

promedio a través de la integración numérica inicialmente propuesta para calcular esta variable. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Diámetro promedio de las gotas para caso de verificación

	<b>Simulación</b>	<b>Modelo matemático</b>
<b>Diámetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	1.53	1.58

Estos resultados muestran como la correlación obtenida representa adecuadamente la relación entre el diámetro promedio de las gotas y la velocidad de la fase continua con la que se opera y la presión a través de la membrana aplicada para formar la emulsión, ya que se obtiene una desviación de 3.30%, que puede considerarse dentro de los límites aceptables para las dimensiones trabajadas.

De esta manera es posible determinar las variables de operación adecuadas para lograr la formación de una emulsión que presente un tamaño promedio de gotas determinado de acuerdo a la estabilidad y propiedades deseadas para dicha emulsión.

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la formación de emulsiones empleando membranas microporosas como una de las alternativas de menor costo energético para disminuir la viscosidad del crudo y a su vez los costos en bombeo. Para esto se simuló numéricamente el proceso de formación de una gota utilizando el método de Elementos de Frontera y un mecanismo de avance en el tiempo de incrementos fijos con un Método de Runge Kutta orden dos.

Con este método se evaluó el efecto de la variación de algunos de los parámetros de entrada como la caída de presión a través de la membrana y la velocidad de la fase continua sobre las variables de salida más relevantes del proceso.

Los resultados obtenidos muestran que el tamaño final de las gotas es una función no sólo de las propiedades de los fluidos involucrados en la emulsión, sino también de las variables operacionales como la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana. Valores para la velocidad de la fase continua en un rango de 0.02 m/h a 0.03 m/h y para la presión a través de la membrana de 100 kPa a 200 kPa, generan emulsiones de fase monodispersa con un tamaño de gota que va desde 1.13  $\mu\text{m}$  hasta 1.96  $\mu\text{m}$ . Los costos de producción empleando membranas microporosas para obtener emulsiones con este tamaño, se encuentran alrededor de \$19/m<sup>3</sup> de emulsión producida; presentándose una reducción de costos de alrededor del 95% con respecto a los métodos tradicionales de formación de emulsiones. Estos resultados son mayores a los registrados en la literatura, pero acordes a las tendencias ya reportadas.

Con el fin de encontrar una expresión que permita relacionar el tamaño promedio de las gotas en la emulsión con las variables operacionales, se construyó una correlación experimental a partir de las variaciones realizadas en la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana. Dicha correlación describe el diámetro final de las gotas como función de dichas variables. Los resultados de este análisis muestran que el diámetro promedio de las gotas depende de una manera directa de la velocidad de la fase

continua y de forma inversa de la presión a través de la membrana y que un modelo lineal es suficientemente bueno para describir el proceso pues permite obtener resultados con desviaciones alrededor del 4.0% respecto a los valores de tamaño promedio de las gotas que se obtienen directamente a partir de las simulaciones.

Finalmente simular computacionalmente la emulsificación con membranas microporosas permitió predecir el comportamiento, tamaño y distribución de las gotas en la fase dispersa; además de brindar la posibilidad de evaluar el efecto de variables críticas a la hora de realizar la emulsión, como lo son la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana, y encontrar los valores adecuados para cumplir los requerimientos que se tengan en cuanto a estabilidad y dispersión de la emulsión sin necesidad de incurrir en costos para realizar prototipos del proceso o para evaluar el desempeño de los mismos en caso de tenerlos.



## 5. BIBLIOGRAFIA

Alboudwarej, H., Felix, J., Taylor, S., Badry, R., Bremner, C., Brough, B., y otros. (2006). La importancia del petróleo pesado. *Oilfield review*, 38-59.

ANDI. (2011). *Andi*. Recuperado el 22 de febrero de 2012, de [http://www.andi.com.co/pages/prensa/comunicados\\_prensa\\_detalle.aspx?Id=212](http://www.andi.com.co/pages/prensa/comunicados_prensa_detalle.aspx?Id=212)

Corredor, L. M., & Valero, M. L. (2004). *Estudio y análisis del procesamiento a nivel piloto de crudos pesados por conversión térmica*.

De Luca, G., Di Maio, F. P., Di Renzo, A., & Drioli, E. (2008). Droplet detachment in cross-flow membrane emulsification: Comparison among torque- and force-based models. *Chemical Engineering and Processing*, 1150-1158.

ECOPETROL. (2012). *ECOPETROL*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2012, de <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=234&conID=37722>

ECOPETROL. (2012). *ECOPETROL*. Recuperado el 14 de Agosto de 2012, de <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=411&conID=46112>

ECOPETROL. (2012). *Visión al 2020 del Grupo Empresarial*. Bogotá.

Egidi, E., Gasparini, G., Holdich, R. G., Vladislavljevic, G. T., & Kosvintsev, S. R. (2008). Membrane emulsification using membranes of regular pore spacing: Droplet size and uniformity in the presence of surface shear. *Journal of Membrane Science*, 414-420.

Giraldo, M., Power, H., & Flórez, W. (2007). Mobility of a Viscous Newtonian Drop in Shear Newtonian Flow. *International Journal of Dynamics of Fluids Vol. 3*, 109-132.

Giraldo, M., Williams, R. A., Florez, W., & Power, H. (2011). Evaluation of drop formation through a micropore by means of boundary integral formulations. *Proceedings of the 8th UK Conference on Boundary Integral Methods* (págs. 1-8). UK: University of Leeds.

Grupo de Energía y Termodinámica. (2012). Medellín.

Guizard, C. (1999). *Clasificación de las membranas y de los procesos que las utilizan*. Mérida.

Hasan, S. W., Ghannam, M. T., & Esmail, N. (2010). Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel Vol. 89*, 1095-1100.

Johnsen, E. E., & Ronningsen, H. P. (2003). Viscosity of 'live' water-in-crude-oil emulsions: experimental work and validation of correlations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 23-36.

Joscelyne, S. M., & Trägårdh, G. (2000). Membrane emulsification - a literature review. *Journal of Membrane Science*, 107-117.

Koris, A., Piacentini, E., Vatai, G., Drioli, E., & Giorno, L. (2011). Investigation on the effects of a mechanical shear-stress modification method during cross-flow membrane emulsification. *Journal of Membrane Science* 371, 28-36.

Laurencio Alfonso, H., & Delgado Drubey, Y. (2007). PROPIEDADES REOLÓGICAS DE EMULSIONES DE PETRÓLEO PESADO EN AGUA. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería Vol. 16*, 244-249.

Lesaint, C., Spets, O., Glomm, W., Simon, S., & Sjöblom, J. (2010). Dielectric response as a function of viscosity for two crude oils with different conductivities. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 20-26.

Martínez Palou, R., Mosqueira, M. L., Zapata Rendón, B., Mar Juárez, E., Bernal Huicochea, C., Clavel López, J., y otros. (2011). Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering Vol. 75*, 274-282.

Mathpro. (24 de Octubre de 2011). *THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION*. Recuperado el 13 de Agosto de 2012, de [http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT\\_RefiningTutorial\\_Spanish.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf)

Nakashima, T., Shimizu, M., & Kukizaki, M. (1991). Membrane emulsification by microporous glass. *2nd International Conference on Inorganic Membranes*, (pág. 513). Montpellier.

Odicino, L., Follari, J., & Lesino, G. (2011). *Destilación por membranas microporosas*. San Luis: Universidad Nacional de San Luis.

- Palotas Kelen, L. V., & Vanegas Angarita, O. (2011). Proyectos Ecopetrol-PDVSA: Regímenes Petroleros, Seguridad Energética, Paralelos Eurasiáticos. *Reflexión Política*, 192-207.
- Peng, S. J., & Williams, R. A. (1998). Controlled production of emulsions using a crossflow membrane. Pat I: Droplet Formation from a Single Pore. *Trans IChemE, Vol 76, Part A*, 894-901.
- Perez Marzulli, A., Cardenas, A., & Bullon, J. (2010). *Emulsión con Membranas*. Mérida: Universidad Central.
- Ramírez, M., Ávila, R., & Aguilar, M. (2012). *Tarifas y disponibilidad de energía eléctrica y gas natural en el sector industrial colombiano*.
- Sadurni, N., Solans, C., Azemar, N., & García Celma, M. J. (2005). Studies on the formation of O/W nano-emulsions, by low-energy emulsification methods, suitable for pharmaceutical applications. *European Journal of Pharmaceutical Sciences Vol. 26*, 438-445.

Schröder, V., Schubert, H., & Behrend, O. (1998). Effect of Dynamic Interfacial Tension on the Emulsification Process Using Microporous, Ceramic Membranes. *Journal Of Colloid And Interface Science*, 334-340.

*SieHeMechanical and Electrical*. (s.f.). Recuperado el 10 de Agosto de 2012, de [http://www.sieheindustry.com/en/Fluid-Machinery/Emulsifiers/Inline-High-shear-Emulsifier-\(Three-Stage\).html](http://www.sieheindustry.com/en/Fluid-Machinery/Emulsifiers/Inline-High-shear-Emulsifier-(Three-Stage).html).

Timgren, A., Trägradh, G., & Trägardh, C. (2010). A model for drop size prediction during cross-flow emulsification. *Chemical Engineering Research and Design*, 229-238.

Vladisavljevic, G. T., Khalid, N., Neves, M. A., Kuroiwa, T., Nakajima, M., Uemura, K., y otros. (2013). Industrial lab-on-a-chip: Design, applications and scale-up for drug discovery and delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 38.

## 6. ANEXOS

### 6.1 DOCUMENTO PROCEDIMENTAL PARA DETERMINAR EL DIÁMETRO DE LAS GOTAS EN UNA EMULSIÓN CRUDO EN AGUA

Para determinar el diámetro final de las gotas de una emulsión crudo en agua, utilizando un crudo pesado típico colombiano con propiedades como las descritas en la Tabla 2 y teniendo características para los dos fluidos involucrados en la emulsión similares a las presentadas en la Tabla 3, es posible llevar a cabo el siguiente procedimiento:

1. Definir los valores para cada una de las variables críticas en el proceso de formación de la emulsión, que son la velocidad de la fase continua y la presión a través de la membrana.
2. Reemplazar en la ecuación (11), determinada durante la construcción del modelo matemático, los valores seleccionados para la presión a través de la membrana y el flujo de la fase dispersa.

$$d = -0.0031 P + 25.63 F + 1.2013 \quad (11)$$

En caso de conocerse el diámetro final de las gotas y alguna de las variables involucradas en el modelo, éste se puede utilizar para determinar la variable desconocida.

Bajo las propiedades ya descritas se recomienda que para velocidades de la fase continua entre 0.02 m/h y 0.04 m/h se empleen presiones a través de la membrana superiores a 100 kPa e inferiores a 300 kPa, ya que presiones menores requerirán velocidades de la fase continua inferiores con el fin de evitar el arrastre de la gota y asegurar su formación completa, mientras que para presiones mayores se requerirán velocidades superiores cuya fuerza logre vencer la resistencia creada por la presión a través de la membrana y asegure que las gotas son formadas y desprendidas de manera adecuada.