



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**MICRODISPOSITIVO PARA EL FORZAMIENTO PULSADO DE
INTERFASES FLUIDAS UTILIZANDO MICROGOTAS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICO**



PRESENTA

PEDRO ANDRÉS BASILIO ÁVILA

CIUDAD DE MÉXICO

AÑO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Luis Miguel Trejo Candelas
VOCAL: Profesor: Luis Fernando Olgúin Contreras
SECRETARIO: Profesor: Aimee Magdalena Torres Rojas
1er. SUPLENTE: Profesor: Salvador Guadalupe Hernández Vargas
2° SUPLENTE: Profesor: Eugenia Corvera Poiré

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Biofisiología
L309 Edificio F2
Departamento de Fisiología
Facultad de Química
Universidad Nacional Autónoma de México

SUSTENTANTE: PEDRO ANDRÉS BASILIO ÁVILA _____

ASESOR DEL TEMA: DR. LUÍS FERNANDO OLGUÍN CONTRERAS _____

SUPERVISORA TÉCNICA: DRA. EUGENIA CORVERA POIRÉ Eugenia Corvera Poiré

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por haberme dado la oportunidad de estudiar en esta institución y por permitirme desarrollar en lo profesional como en lo personal.

A mis sinodales, por tomarse parte de su tiempo en la revisión de mi trabajo y brindarme sus sugerencias.

A los profesores que tuve a lo largo de toda la carrera, que fueron una parte importante en mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada a través del proyecto 219584.

A la Dra. Eugenia Corvera Poiré por el otorgamiento de un apoyo económico como ayudante de Investigador Nacional Nivel III.

Agradecimiento al Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado (PAIP 5000-9023) de la Facultad de Química.

Índice

| | Página |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Objetivos..... | 3 |
| Hipótesis..... | 3 |
| 1. ANTECEDENTES | 4 |
| 1.1 Flujos pulsátiles y algunos ejemplos de cómo producirlos..... | 4 |
| 1.2 Microfluídica..... | 10 |
| 1.2.1 Flujos pulsátiles en microfluídica..... | 10 |
| 1.2.2 Sistemas microfluídicos basados en microgotas..... | 17 |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS | 19 |
| 2.1 Fabricación de microdispositivos de microfluídica por fotolitografía suave..... | 19 |
| 2.2 Diseño del microdispositivo..... | 20 |
| 2.3 Metodología de fabricación de moldes para microchips por fotolitografía suave..... | 21 |
| 2.4 Fabricación de Microchips..... | 25 |
| 2.5 Caracterización de los microchips (Determinación experimental del ancho y alto de los microcanales)..... | 28 |
| 2.6 Fluidos..... | 29 |
| 2.7 Adquisición de videos..... | 29 |
| 2.8 Análisis de los videos en Tracker..... | 32 |
| 3. DISEÑO EXPERIMENTAL | 34 |
| 3.1 Funcionamiento del microdispositivo..... | 34 |
| 3.2 Elección de fluidos..... | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3 Introducción del fluido que forma la interfase con el aceite..... | 37 |
| 3.3.1 Sistema 1: Columna de Agua..... | 37 |
| 3.3.2 Sistema 2: Tercera Bomba..... | 39 |
| 3.4 Zona de estudio en el Microcanal de la Interfase..... | 42 |
| 4. TRATAMIENTO DE DATOS..... | 43 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 46 |
| 5.1 Formación de microgotas..... | 46 |
| 5.1.1 Relación de Flujos y Frecuencias..... | 46 |
| 5.1.2 Relación del tamaño de las gotas con la frecuencia..... | 47 |
| 5.2 Descripción Cualitativa..... | 50 |
| 5.2.1 Descripción de las Interfases de estudio..... | 50 |
| 5.2.2 Descripción cualitativa de la interfase agua-aceite..... | 51 |
| 5.2.3 Descripción cualitativa de la interfase aceite-poliacrilamida..... | 60 |
| 5.3 Descripción Cuantitativa..... | 65 |
| 5.4 Análisis del Movimiento Oscilatorio..... | 70 |
| 5.4.1 Gráficas de Velocidad Característica vs Frecuencia Angular..... | 70 |
| 5.4.2 Gráficas VRMS/ longitudes del sistema vs Frecuencia Angular..... | 74 |
| 5.4.3 Número de Womersley..... | 77 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 83 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 85 |

Introducción

El siguiente texto presenta la investigación que se realizó en el Laboratorio de Biofísicoquímica de la Facultad de Química de la UNAM sobre el desarrollo de un pequeño microdispositivo capaz de crear un flujo pulsátil por medio de la técnica de microgotas y con el que se estudió la dinámica oscilatoria de una interfase agua-aceite y una interfase de una solución de poliacrilamida-aceite. El texto está conformado por los siguientes 6 capítulos:

Capítulo 1, Antecedente. En este capítulo se hizo una revisión bibliográfica sobre la importancia y aplicación de los flujos pulsátiles a macroescalas en el sector biológico e industrial, en donde se han desarrollado sistemas y construido equipos que nos permiten generar flujos pulsátiles y con ello estudiar temas relacionados en ambos sectores. Después, se describen los avances en la ciencia de la microfluídica para construir dispositivos que hagan oscilar un fluido a microescalas. En especial se reportan algunos ejemplos en la literatura sobre la construcción de microchips que no requieren de equipos electrónicos o mecánicos externos para pulsar los fluidos. Al final de este capítulo se presentan los objetivos y las hipótesis más importantes del trabajo.

Capítulo 2, Materiales y Métodos. Se explica cómo se diseñó el microchip que se utilizó en los experimentos y cómo se fabricó éste usando la técnica de fotolitografía y litografía suave. Respecto a los experimentos, se describe la preparación de los fluidos que se estudiaron y cómo se capturaron videos de los movimientos dentro del microchip con ayuda de un microscopio y una cámara rápida de video. Por último, se habla sobre el análisis de los videos con el programa de computación Tracker.

Capítulo 3, Diseño Experimental. Trata sobre el funcionamiento del microchip desarrollado; la elección de los fluidos que conforman las interfases de estudio; las pruebas que hicimos con dos sistemas diferentes de presión (sistema con una columna de agua y el sistema con una bomba para jeringas); la razón de la elección del sistema con bomba para jeringas para la realización de los experimentos y al final se comenta sobre la zona del microchip donde se realizaron las mediciones.

Capítulo 4, Tratamiento de Datos. Habla sobre el desarrollo de un programa en Mathematica que permite obtener la amplitud y la frecuencia del movimiento de las interfases estudiadas.

Capítulo 5, Resultados y Discusión. Está dividido en varios apartados. En la sección 5.1, se hizo un análisis detallado sobre las dimensiones de las microgotas (ancho y largo) y sobre la distancia entre ellas en función de la cantidad de flujo de agua y aceite que fueron suministrados al microchip para la creación de las mismas. Las secciones 5.2 y 5.3 están enfocadas al análisis de la forma y el movimiento de las interfases estudiadas al paso de las microgotas. Primero se describió la dirección del menisco de las interfases dentro del microchip y después, por medio del estudio de las imágenes obtenidas de los videos, se analizó si por cada gota se producía un ciclo de oscilación de la interfase. Finalmente, se hizo un análisis cuantitativo de cómo la frecuencia del paso de las microgotas afecta la amplitud de oscilación y la velocidad de las interfases. Además, se realizó un análisis del número de Womersley para las dos interfases.

Por último, en el Capítulo 6, Conclusiones Generales, se muestran los logros y hallazgos más importantes de este trabajo.

Objetivos

- Diseñar, construir y poner en funcionamiento un microdispositivo hecho de polidimetilsiloxano que sea capaz de generar un gradiente de presión pulsado sobre una interfase mediante la técnica de microgoteo.
- Estudiar la dinámica de una interfase agua-aceite mineral (ambos fluidos newtonianos) dentro de un microcanal de microfluídica cuando es perturbada por un gradiente de presión pulsado a distintas frecuencias.
- Estudiar la dinámica de una interfase solución de poliacrilamida-aceite mineral (un fluido viscoelástico y un fluido newtoniano) dentro de un microcanal de microfluídica cuando es perturbada por un gradiente de presión pulsado a distintas frecuencias.
- Determinar el número de Womersley para las dos interfases estudiadas.

Hipótesis

En la literatura se han reportado microchips de microfluídica que permiten mover flujos a microescala de manera pulsada. Sin embargo, en su gran mayoría estos sistemas requieren de actuadores mecánicos externos (por ejemplo, piezoeléctricos o válvulas solenoides) que necesitan instrumentación costosa para funcionar. En este trabajo proponemos como primera hipótesis que el paso continuo de microgotas de agua en aceite en un canal de microfluídica generará una diferencia de presión que puede ser aprovechada para mover de manera pulsada y pulsada una interfase en un canal lateral al paso de las gotas.

En segundo lugar, proponemos estudiar dos interfases de naturaleza fisicoquímica distinta: la primera estaría formada por agua-aceite mineral, ya que ambos son fluidos newtonianos. La segunda interfase estaría formada por una solución acuosa de poliacrilamida y aceite mineral. En este caso la solución de poliacrilamida es un fluido viscoelástico y con una viscosidad mucho mayor que la del agua. Nuestra hipótesis es que, la viscosidad más grande de la poliacrilamida influirá en la dinámica de la interfase haciendo que su velocidad de movimiento sea menor en comparación con la de la interfase agua-aceite.

1. Antecedentes

1.1 Flujos pulsátiles y algunos ejemplos de cómo producirlos

Los flujos pulsados se encuentran en sistemas biológicos, microfluídicos e industriales. En el aspecto biológico, el ejemplo más común es el corazón, el cual es una bomba que genera un movimiento periódico que se encarga de distribuir la sangre a todo el cuerpo por medio de las arterias con una frecuencia específica.

Debido a la relevancia que tiene el flujo sanguíneo se han llevado a cabo estudios en los cuales se han montado experimentos para generar un flujo pulsátil parecido al del sistema circulatorio y con ello poder adquirir nuevos conocimientos sobre sus funciones y enfermedades relacionadas con este sistema. Así mismo, se han empezado a desarrollar nuevos dispositivos que pueden ser utilizados en pacientes que esperan un trasplante o pacientes que están en medio de una operación con el fin de mantener bombeando su corazón. A continuación, se muestran algunas investigaciones, en las cuales se necesitó llevar a cabo la generación de un flujo pulsátil para estudiar algunos problemas relacionados al sistema circulatorio:

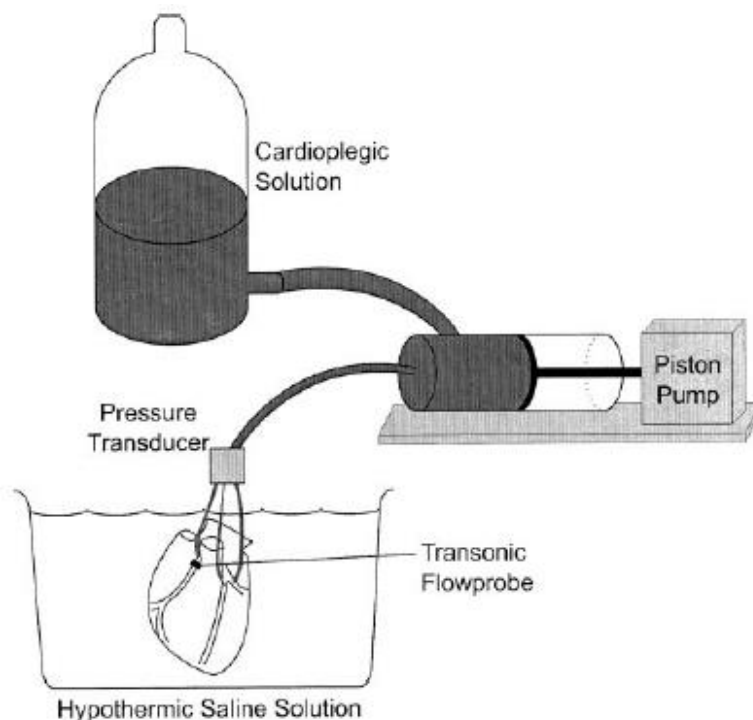


Figura 1. Esquema del sistema para mediciones de flujo pulsátil. El sistema consistió en un baño de solución fría y en su interior fue colocado el corazón de un porcino con los vasos dilatados detenidos en diástole. El flujo pulsátil fue creado por una bomba de pistón que se encargaba de inyectar una solución cardiopléjica contenida en una botella de 2 litros en las arterias coronarias a través de un flujo pulsátil. Por último, una sonda de flujo perivascular y un transductor de presión fueron montados en las arterias coronarias. Tanto el módulo de flujo como el transductor de presión fueron controlados por un sistema de adquisición de datos. Tomada de [1].

Teniendo en cuenta que las arterias coronarias son importantes en el suministro de sangre al músculo cardíaco, con el sistema mostrado en la Figura 1 se investigó la distribución del flujo sanguíneo pulsátil a lo largo del tronco de la arteria coronaria mayor y las ramas primarias (ramas que surgen directamente del tronco). Se encontró que el flujo sanguíneo a través del tronco muestra una caída gradual a lo largo de la ruta hacia los vasos capilares, mientras que el flujo del tronco a las ramas primarias tiene una caída brusca debido a que los segmentos del tronco tienen un diámetro mucho más grande que las ramas primarias [1].

También se han desarrollado dispositivos de acción pulsátil que son de utilidad en la investigación cardiovascular porque emulan la función del bombeo cardíaco como lo son injertos, prótesis vasculares o equipos de circulación extracorpórea. Por ejemplo, los dispositivos de asistencia ventricular izquierda de flujo pulsátil (en inglés, Left Ventricular Assist Device Pulsatile Flow), son implantados en pacientes con insuficiencia cardíaca y están diseñados para asegurar una buena calidad de vida del paciente mientras se espera un trasplante de corazón (Figura 2) [2]. Estos dispositivos funcionan de la siguiente forma:

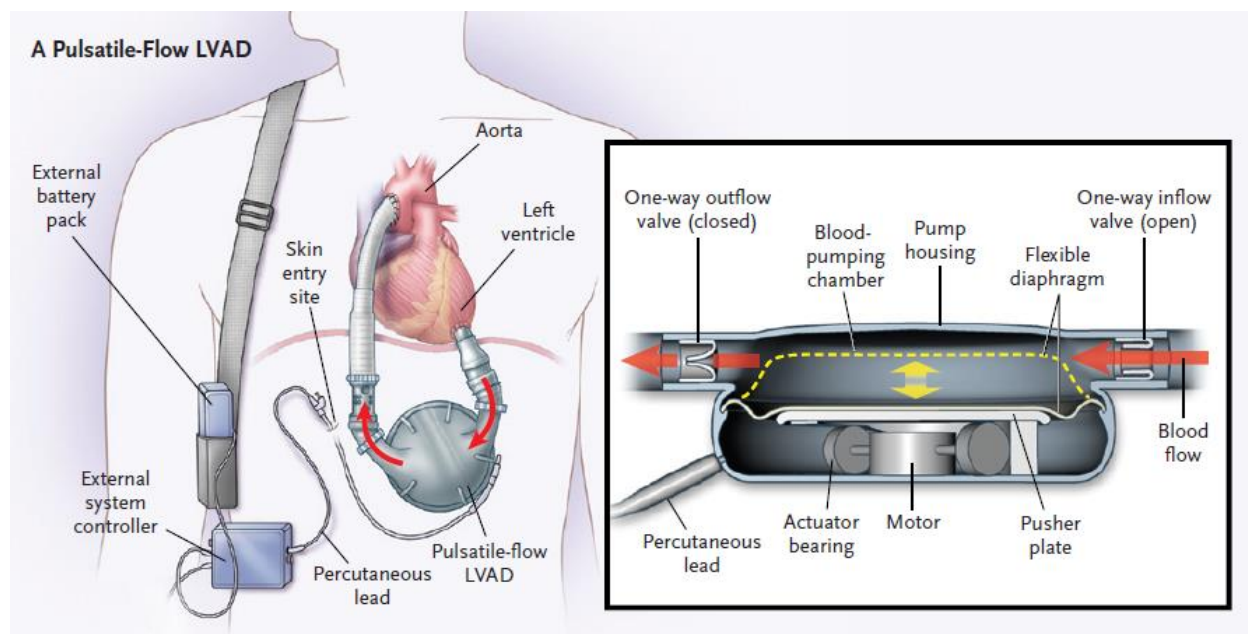


Figura 2. Dispositivos de asistencia ventricular izquierda de flujo pulsátil. Tomada de [2].

La bomba es accionada por medio de un cable percutáneo que conecta la bomba a un controlador externo y una fuente de alimentación. Una vez encendida la bomba, la sangre es extraída del ápice del ventrículo izquierdo y es llevada hacia una cámara de bombeo de sangre. Ahí, la sangre es bombeada por una placa mecánica la cual actúa

por medio de un motor. Al final, la válvula de salida se abre para que la sangre bombeada sea entregada a la aorta ascendente [2]. Otro ejemplo, es una bomba de flujo pulsante (BECAP), que es un dispositivo de bombeo pulsátil automatizado que emula las condiciones hemodinámicas en un ambiente de circulación extracorpórea. Su finalidad es reemplazar otras bombas de circulación extracorpórea convencionales en donde el tipo de flujo que se forma en la salida no es pulsátil [3]. En la siguiente imagen se describe cada una de las partes que conforman este dispositivo además de su funcionamiento:

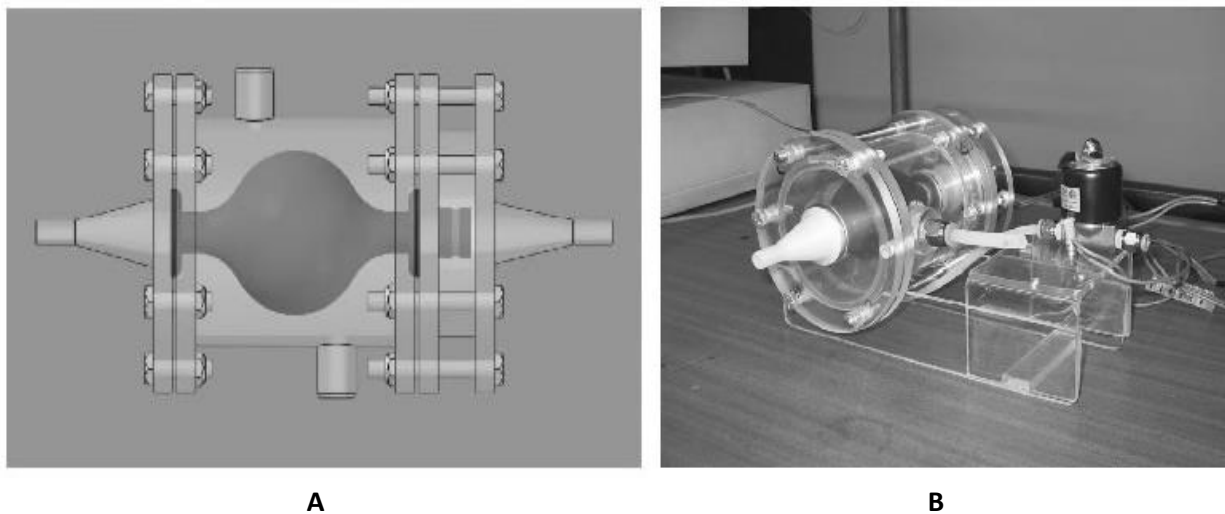


Figura 3-A. Configuración de la bomba de flujo pulsante BECAP diseñada. El modelo de bomba de flujo pulsante (BECAP) está compuesta por una carcasa rígida de forma cilíndrica y un diafragma elástico en forma elipsoidal. Tomada de [3].

Figura 3-B. Prototipo de la bomba de flujo pulsante BECAP construida. Para generar el flujo pulsátil, la BECAP tiene un ciclo de dos fases: una activa o de expulsión, en la que se aplica el aire comprimido para deformar el volumen del diafragma y producir así el flujo del líquido contenido en el diafragma a una presión de pulso específica; y otra pasiva o de relajación, en la cual se hace vacío para extraer el aire acumulado y recuperar la forma natural del diafragma, además de reponer el volumen expulsado en la fase anterior. Tanto el aire comprimido como el vacío se ajustan con válvulas reguladoras y se aplican a la cámara mediante válvulas solenoides accionadas por el controlador, con el cual se varía la frecuencia de operación. Además, al sistema se le agregó un flujómetro y unos transductores electrónicos para medir la presión. Tomada de [3].

Con el equipo BECAP se evaluó la respuesta del flujo pulsante ante variaciones de la viscosidad. Para ello se analizó la presión de pulso y el flujo en dos tipos de fluidos: agua y, debido a que esta bomba está destinada a trabajar en un ambiente de circulación extracorpórea, una mezcla de agua con carboximetilcelulosa que resultó tener una viscosidad diez veces mayor a la sangre [3]. Posteriormente, los datos de la mezcla fueron comparados con los del agua, obteniendo para la mezcla una disminución de flujo casi cercana al 50% y para la presión hubo una leve disminución. Por lo tanto, a pesar de que la bomba es un prototipo, se pudieron hacer buenas pruebas para ambos fluidos

y se reconocieron las variables que se tienen que mejorar para aumentar la potencia de operación para compensar los aumentos de viscosidad correspondientes a la contractilidad cardíaca [3].

En el aspecto industrial, se han desarrollado equipos o aparatos que actúan mediante la generación de un flujo pulsátil y estos a su vez inciden en el funcionamiento de algunos sistemas mecánicos, los cuales contribuyen a nuestro bienestar y han cambiado la forma en que experimentamos la vida, por ejemplo, el motor de los coches que manejamos. Dentro del motor, el componente que se encarga de la generación de este flujo pulsátil son los pistones. A continuación, se explica la generación de este flujo pulsátil en un motor de cuatro tiempos utilizando la Figura 4:

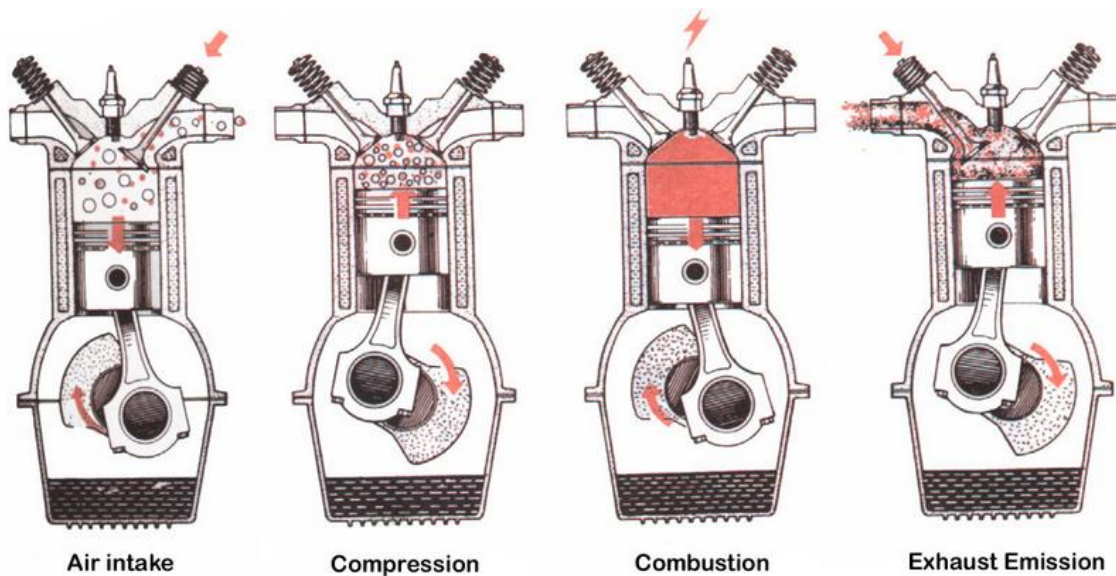


Figura 4: Funcionamiento de un motor de diésel de 4 tiempos. 1. Ciclo de admisión (en inglés, Air intake): con la válvula de admisión abierta, el pistón realiza una carrera descendente, la depresión formada en el cilindro hace que entre aire del exterior. 2. Ciclo de compresión (en inglés, Compression): las válvulas de admisión y escape están cerradas y el pistón comienza su carrera ascendente, durante la última parte del ciclo de compresión se produce la inyección del combustible a alta presión. 3. Ciclo de combustión (en inglés, Combustion): Comienza antes de que termine el ciclo de compresión, debido a la compresión, la mezcla de aire y combustible alcanzan una alta temperatura haciendo que la mezcla se autoencienda, sin recurrir a bujías de ningún tipo. Debido a la combustión de la mezcla, el pistón es empujado hacia abajo produciendo el trabajo requerido para proporcionar movimiento a la mecánica. 4. Ciclo de escape (en inglés, Exhaust Emission): De nuevo en carrera ascendente, el pistón empuja los gases resultantes de la explosión hacia el escape a través de las válvulas de escape que está abierta [4]. Figura tomada de <https://www.thinking.com/scene/634394655630295040>.

Incluso también hay equipos de flujo pulsátil que forman parte de una red de tuberías y ayudan a la realización de procesos en las industrias, por ejemplo, en la industria petrolera, los compresores recíprocos son utilizados para transportar los gases desde pozos productores de baja presión hasta las plantas de procesamiento [5]. Estas

máquinas comprimen el gas mediante el desplazamiento de un pistón dentro de un cilindro. El pistón es la pieza que genera el flujo pulsátil [6]. A continuación, se describe la generación de este flujo pulsátil:

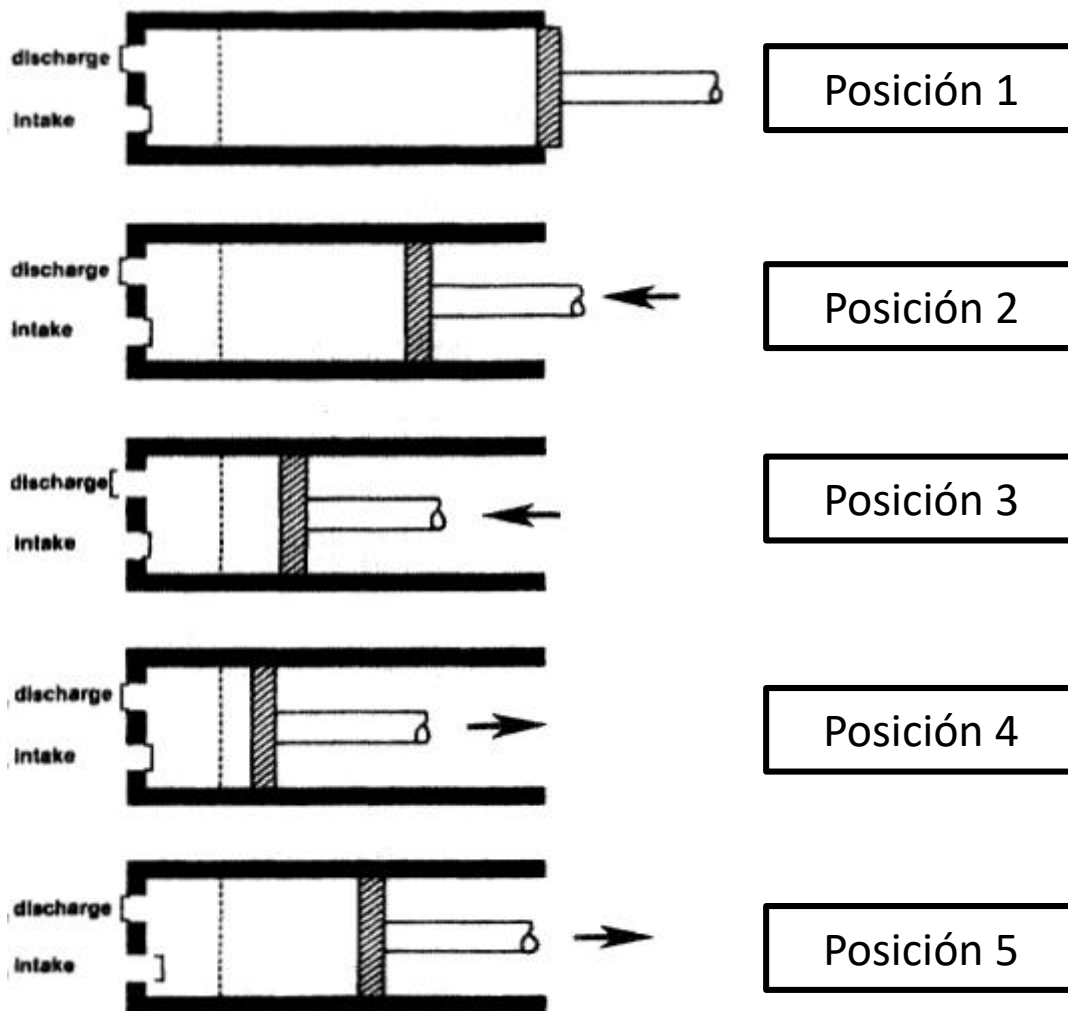


Figura 5. Pasos en el ciclo de un compresor recíproco. Posición 1. En este punto, el cilindro se ha llenado de gas en presión de admisión, tenga en cuenta que ambas válvulas están cerradas. Posición 2. Esta es la parte de compresión del ciclo, el pistón ha comenzado a moverse hacia la izquierda. Posición 3. En este punto la presión del cilindro supera a la presión existente en la tubería de descarga. Este diferencial origina la apertura de la válvula de la descarga provocando que la descarga o transferencia de gas continúe hacia la tubería. Posición 4. Una vez que se ha completado toda la descarga, el pistón invierte la dirección. Las dos válvulas están cerradas. Posición 5. Inicia la carrera de succión, se produce la apertura de la válvula de succión permitiendo el ingreso del gas al cilindro. Tomada de [6].

Otro ejemplo, es la bomba centrífuga, este tipo de bombas son utilizadas dentro de los sistemas de distribución: se encargan de transportar agua cruda a la planta de tratamiento, de descargar agua a presión en la red de tuberías y levantar el agua a donde no puede ir por gravedad, especialmente a las torres de agua [7].

En su forma más simple consiste en un impulsor rotatorio o rodete constituido por un conjunto de paletas o aspas abiertas y semiabiertas [8]. En las siguientes imágenes se observan las partes que forman la bomba centrífuga y se describe su funcionamiento:

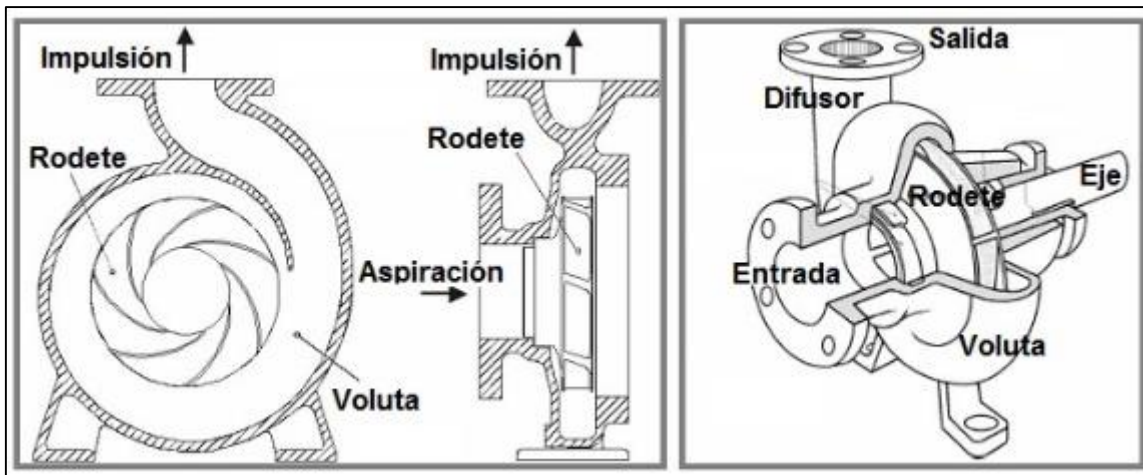


Figura 6. Bomba Centrífuga. La energía de estos sistemas es suministrada por una fuente externa (motor eléctrico, turbina, etc.), la cual hace rotar al impulsor que se encuentra en el interior de la carcasa fija (voluta) provocando que el fluido llegue a la succión de la bomba con una presión menor. Una vez que el fluido ha penetrado en el impulsor, circula radialmente hacia afuera y será descargado hacia la carcasa o cámara de presión. Al salir por la descarga de la bomba tiene una presión más alta, lo que le permitirá seguir su curso [8]. Figura tomada de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html>.

El flujo pulsátil se realiza en el espacio estrecho entre el impulsor y la carcasa en el área de descarga de la carcasa. Cuando las paletas cruzan por esta zona se produce un fenómeno llamado corte de agua (en inglés, cutwater), las cuales crean un pulso. El número de pulsaciones dependerá del número de paletas que contiene el impulsor [9].

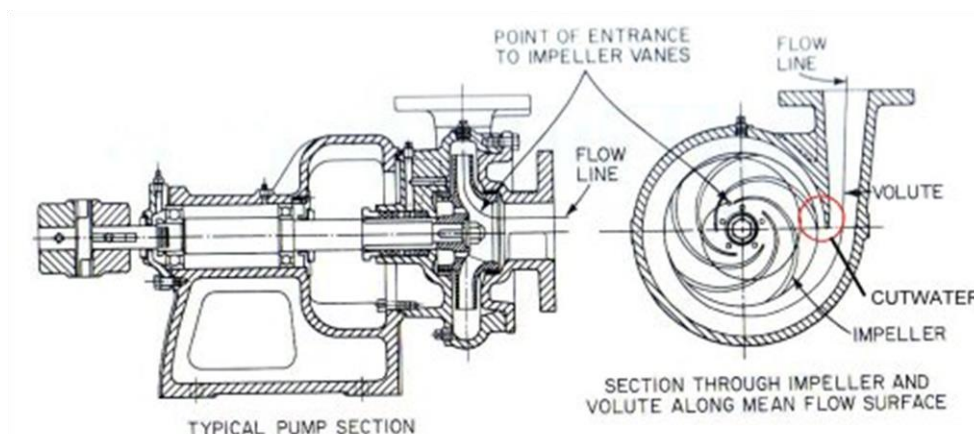


Figura 7. En la imagen del lado izquierdo se muestra el esquema de una típica bomba centrífuga y del lado derecho indicado se indica con una circulo el lugar donde se produce el fenómeno de corte de agua (en inglés, cutwater). Figura tomada de http://www.pumpfundamentals.com/pump_glossary.htm.

1.2 Microfluídica

La microfluídica es la ciencia que se especializa en el estudio de las corrientes de fluidos que circulan en sistemas artificiales microscópicos [10]. Los canales de estos microdispositivos oscilan entre 10 y 500 micras de diámetro y son utilizados para realizar en su interior una gran variedad de ensayos físicos, químicos y biológicos.

1.2.1 Flujos Pulsátiles en microfluídica

En la literatura se han reportado investigaciones en las cuales se han estudiado los flujos pulsátiles en el interior de un microchip.

En el artículo [11], se comenta que hay estudios que han proporcionado evidencia visual sobre fluctuaciones de presión (o pulsos) en un flujo que se establece constante en un microcanal que forma parte de un microchip de PDMS y que la causa de estas fluctuaciones son las oscilaciones mecánicas producidas por el motor que hace funcionar a las bombas para jeringas que introducen los fluidos al microchip. Debido a la falta de un análisis cuantitativo se realizaron 2 experimentos para medir la frecuencia y la amplitud de las fluctuaciones de presión generadas por dichas bombas. El experimento 1 se hizo de la siguiente manera:

Primero, se fabricó un microchip con una geometría conocida como unión en T (Figura 8), se utilizaron dos tipos de jeringas con un diámetro interno diferente las cuales fueron llenadas con agua (fluido de trabajo) y posteriormente fueron colocadas en la bomba para jeringas, después a la bomba se le estableció un flujo constante, se encendió y con ello el émbolo de la jeringa fue presionado haciendo que el fluido sea impulsado y conducido por una tubería que conecta con el microchip para que éste entre a los microcanales.

Dentro de la bomba hay una serie de engranes y tornillos que forman parte del motor. Cuando está encendido el motor, los tornillos y engranes rotan a una velocidad lenta o rápida dependiendo de dos parámetros que son el flujo y el diámetro de la jeringa, de esta manera el émbolo de la jeringa será presionado y desplazado a una velocidad que dependerá de ambos parámetros. Como consecuencia, el fluido contenido en la jeringa saldrá expulsado de ésta y a su vez también será el causante de generar una oscilación mecánica que deriva en una fluctuación de presión del agua que circula por los microcanales del microchip.

Teniendo en cuenta que tendremos un flujo constante y dos jeringas con un diámetro distinto, se piensa que la jeringa con el diámetro interno más pequeño tendrá fluctuaciones en el flujo de agua con una mayor frecuencia y una menor amplitud, debido a que la rotación de los tornillos será rápida y por consecuencia desplazará con menos trabajo el émbolo de la jeringa. En cambio, con la jeringa que tiene el diámetro interno más grande se obtendrán fluctuaciones con una menor frecuencia y una amplitud mayor, debido a que la rotación de los tornillos será más lenta y esto provocará que sea más complicado desplazar el émbolo de la jeringa.

Por último, dentro del microcanal se midió la caída de presión en el fluido por medio de un sensor colocado en la entrada y en la salida del microcanal [11]. En las siguientes imágenes se muestra el modelo del sistema experimental y la gráfica con las mediciones sobre las fluctuaciones de presión:

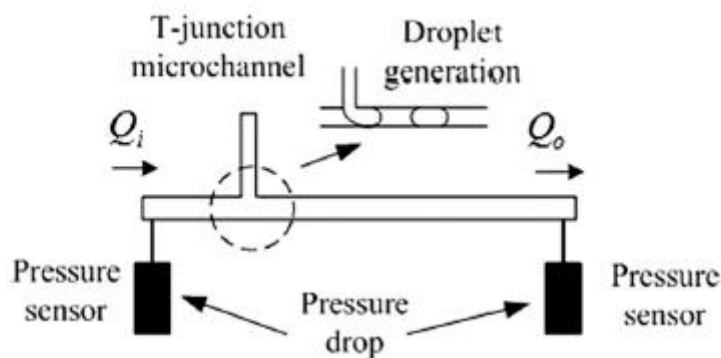


Figura 8. Modelo simplificado del sistema experimental. Q_i y Q_o denotan, respectivamente, el flujo de entrada y salida. Para los experimentos sobre la generación de caída de presión, se usó el mismo dispositivo. Tomada de [11].

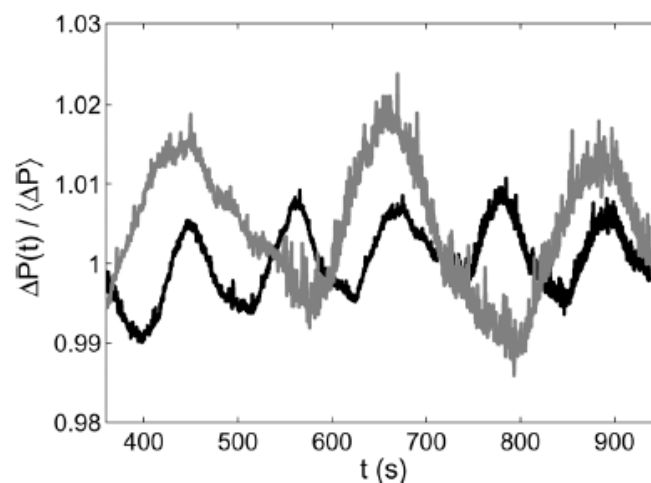


Figura 9. Modelo Fluctuaciones de presión medidas en un microcanal PDMS. Línea oscura diámetro de jeringa = 12.45 mm y línea clara diámetro = 15.90 mm. Tomada de [11].

En la gráfica se pudo ver que las fluctuaciones de presión son aproximadamente periódicas. Se encontró que cuando el diámetro de jeringa es pequeño, la frecuencia aumenta y la amplitud de las fluctuaciones de la presión son pequeñas, en cambio cuando el diámetro de jeringa aumenta, la frecuencia disminuye, pero la amplitud de las fluctuaciones aumenta.

En el experimento 2, se recurrió a la formación de microgotas (gotas de agua en aceite) con el microdispositivo que se ve en la figura 8 [11]. Para la producción de microgotas en un dispositivo con una geometría de unión en T se requirió lo siguiente:

Se utilizaron una bomba para jeringas y dos jeringas -una llena de aceite y la otra de agua- la bomba se encargó de suministrar aceite (fase continua, en inglés, continuous phase) por uno de los microcanales que conforman este dispositivo y por el otro microcanal introducimos agua (fase dispersa, en inglés, dispersed phase). Cuando el flujo del agua es interceptado por el flujo del aceite se generan microgotas que fluyen a lo largo del microcanal por donde circula la fase continua para después ser analizadas (Figura 10).

Durante el experimento se utilizó un flujo constante para el aceite, mientras se iba incrementando el flujo del agua, por lo que la velocidad de rotación de los tornillos del motor de la bomba que suministraba el agua incrementaba. De esta forma, al utilizar flujos de agua altos se obtuvo una disminución en las fluctuaciones de presión haciendo que las microgotas producidas fueran más homogéneas respecto a su longitud.

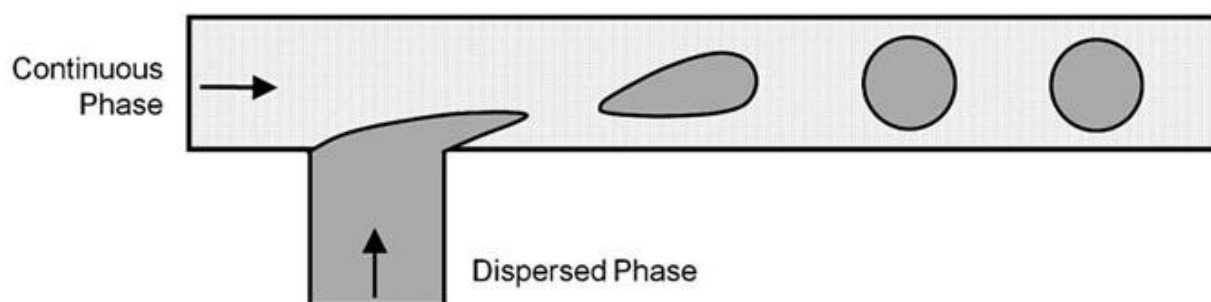


Figura 10. Geometría de una red de microcanales para la formación de microgotas. Geometría de unión en T. Figura tomada de: <http://www.bioscience.org/2013/v5s/af/373/figures.htm>.

En otro artículo se ha fabricado un microchip con el que se pueden manipular los fluidos de forma pulsada mediante el uso de un sistema acústico [12]. A continuación, se muestran las partes que componen este sistema acústico y su funcionamiento dentro del microchip:

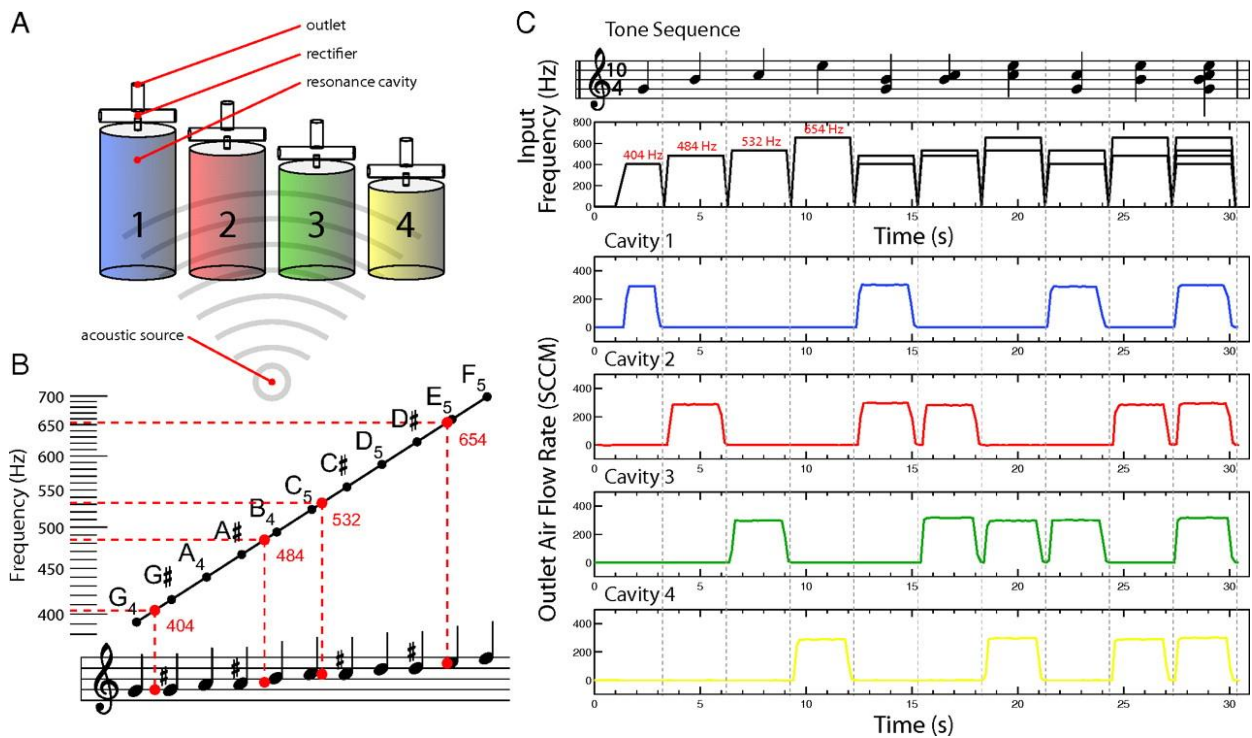


Figura 11. Estudio de flujo de aire desencadenado por resonancia. (A) Representación conceptual del dispositivo que ilustra los componentes clave sujetos a la misma entrada acústica. **(B)** Ubicación de las frecuencias de resonancia de la cavidad en la escala cromática. **(C, Secuencia de tonos)** Ingresas señales acústicas tanto gráficamente como musicalmente por proximidad al tono natural más cercano en la escala cromática. **(C, abajo)** Velocidad de flujo de salida en función del tiempo registrado en las salidas de las 4 estructuras de rectificación. La salida para cada cavidad de resonancia es estable, responde a una única cola musical e insensible a la presencia de otros tonos que compiten. Tomada de [12].

Por medio de una computadora se programó una secuencia de tonos musicales que producen una señal acústica codificada compuesta de una combinación específica de tonos resonantes, las cavidades acústicas experimentan un aumento en la presión del sonido cuando se exponen a un tono resonante y las estructuras de rectificación unidas a las cavidades convierten las presiones oscilantes amplificadas en flujos netos unidireccionales.

Este equipo fue instalado a un microchip de polidimetilsiloxano (PDMS) con 4 canales de entrada paralelos que contenían cada uno una gota de agua de 3 μL (Figura 12). Las secuencias prescritas de notas resonantes, cada una de las cuales era responsable de la actuación de una sola gota, se usaron para activar de manera selectiva a cada una de las gotitas [12]. En la siguiente imagen se explica esto:

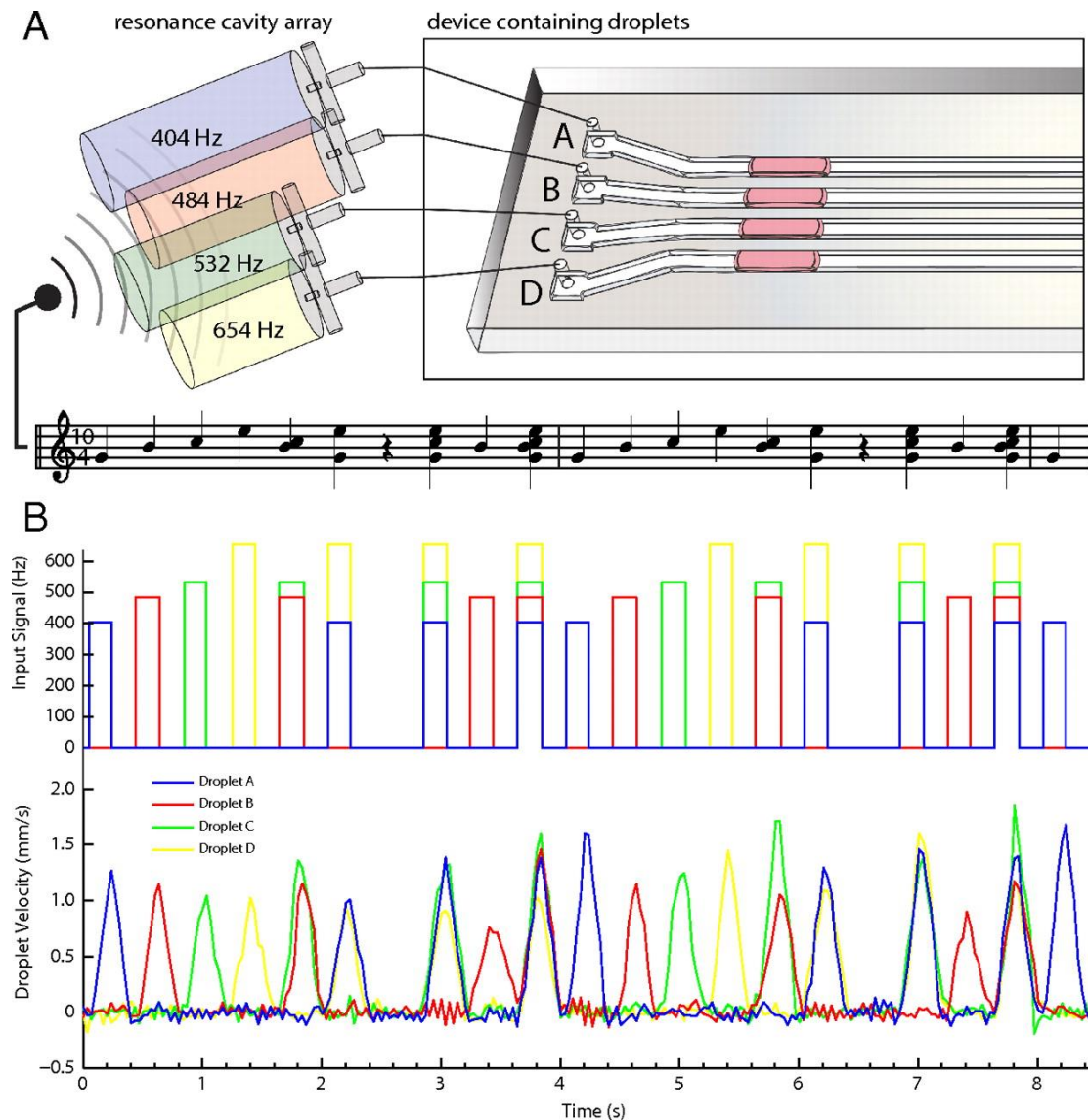


Figura 12. Movimiento de gotitas multiplexado. (A) Representación esquemática de la configuración experimental que representa una señal acústica de entrada entregada a una matriz de cavidades de resonancia, cada una de las cuales está vinculada a una entrada en un dispositivo microfluídico (no a escala). (B) Señal acústica de entrada y velocidad de gota resultante en función del tiempo, que ilustra la actuación programada de gotitas específicas en respuesta a los tonos musicales resonantes suministrados al dispositivo. Tomada de [12].

En otro experimento, los mismos autores utilizaron su sistema acústico para llevar a cabo operaciones de fusión, mezcla, transporte, clasificación y división de fluido dentro de un microchip con una red ramificada de cuatro entradas. El control se realizó en cada una de estas entradas moviendo gotas de fluido de forma pulsátil (Figura 13) [12].

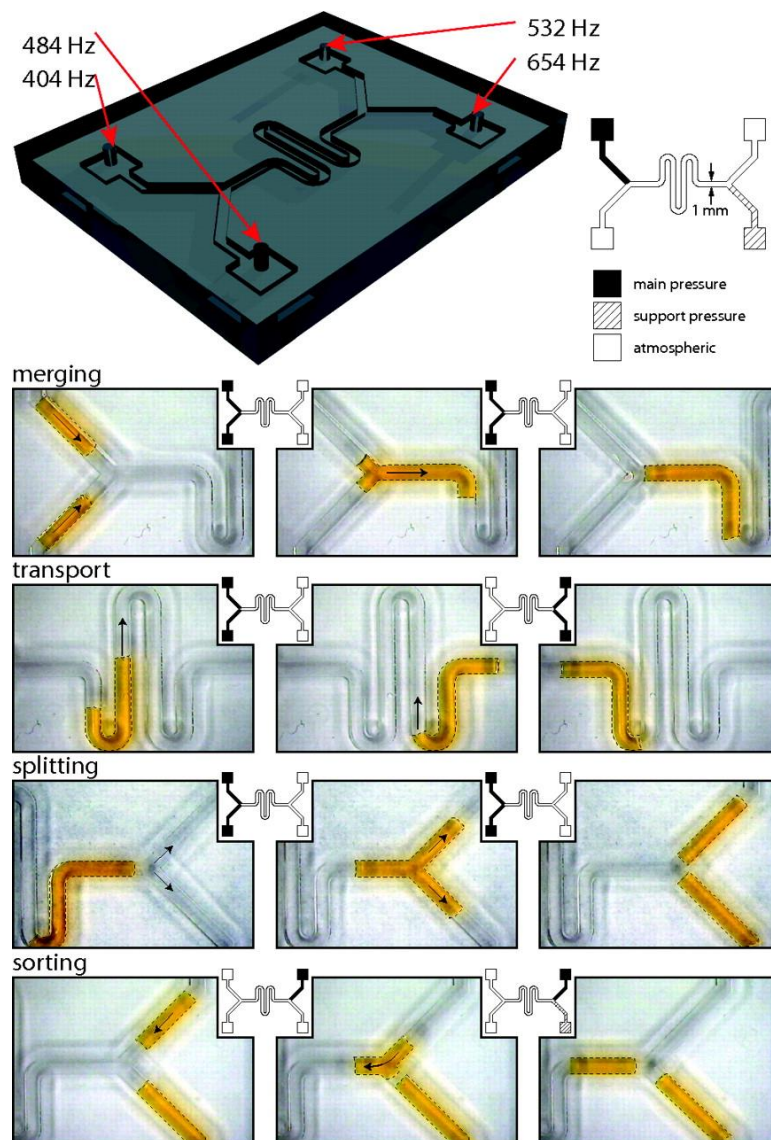


Figura 13. Rendimiento de las operaciones estándar de la unidad de microfluidos mediante el uso de movimiento de gotas controlado acústicamente. (Esquina superior izquierda) Esquema del dispositivo PDMS de canal ramificado con enlaces de cavidad asociados. (Superior derecha) Diseño de canal con la leyenda que ilustra la representación visual de 3 estados de presión. La presión principal indica las áreas donde se aplica una presión significativa para inducir el movimiento de las gotas. La presión de soporte indica las áreas donde se aplica una presión mínima para contrarrestar el movimiento de las gotas. (Abajo) Cuatro conjuntos de imágenes que representan las operaciones estándar de unidades fluidicas de fusión, transporte, división y clasificación. Las flechas en cada imagen indican el movimiento de gotas resultante en respuesta a las presiones generadas acústicamente. Imagen tomada de [12].

En el artículo [13], se fabricó un microdispositivo que en el interior de sus microcanales contiene un conjunto de circuitos que generan flujos intermitentes sin la necesidad de usar un controlador externo, ya que por lo general se requiere de equipos especializados o instrucciones programadas en un ordenador para crear un flujo pulsátil.

La función de este dispositivo fue imitar el flujo vascular en el cuerpo humano por medio de la generación de oscilaciones y con ello estudiar el efecto que tendrían sobre las células endoteliales. En las siguientes imágenes se describen los componentes del dispositivo y el mecanismo por el cual actúan las válvulas del subcircuito del oscilador:

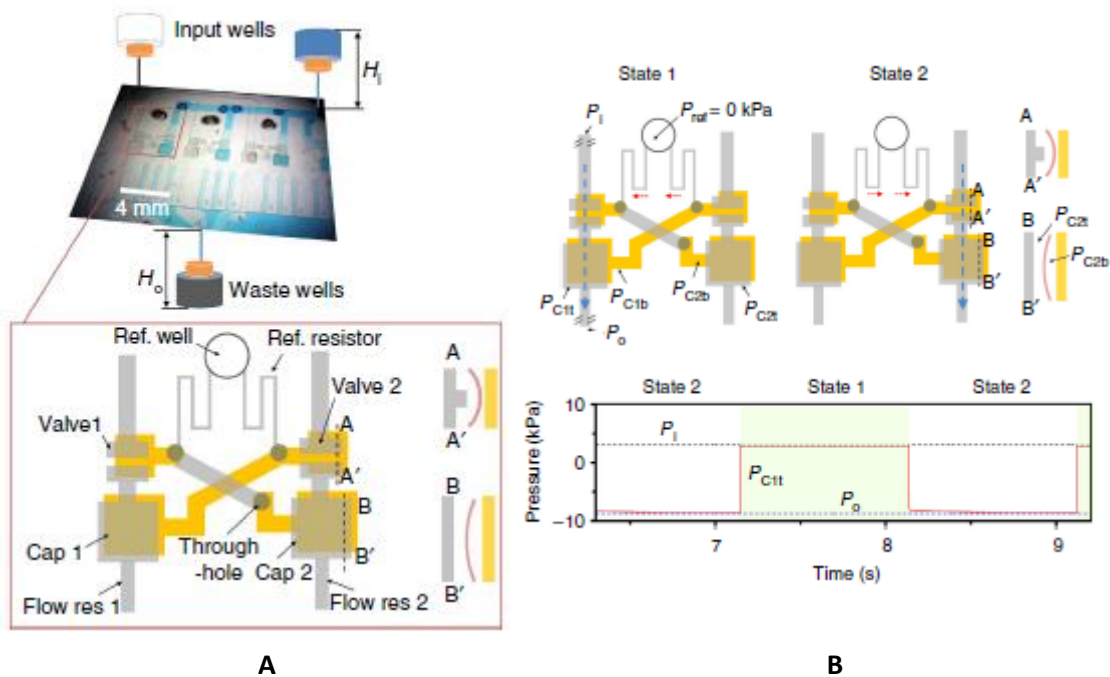


Figura 14-A. Oscilador microfluídico impulsado por gravedad. Se observa la imagen del oscilador microfluídico y un esquema de un subcircuito de oscilador. La diferencia de altura entre los pozos de entrada y el chip oscilador aplica una presión constante sobre los subcircuitos del oscilador. El recuadro muestra el esquema de un subcircuito oscilador, que consta de componentes microfluídicos tales como resistencias microfluídicas y capacitores. Las resistencias microfluídicas son los canales y los capacitores son las cámaras que tienen membranas elastoméricas. Como se muestra en las secciones transversales del esquema, las válvulas y capacitores tienen una capa superior (gris), una capa de cámara inferior (amarillo oscuro) y una membrana elastomérica (rosa). Las deformaciones de las membranas mostradas son el estado de las membranas que estarían justo después de la apertura de la válvula 2. Barra de escala, 4 mm. Tomada de [13].

Figura 14-B. Alternancia de apertura y cierre de las dos válvulas. La válvula 1 se abre en el estado 1, y la válvula 2 se abre en el estado 2. Cuando se abre una válvula, la otra se cierra. Las flechas azules punteadas representan movimiento fluídico que pasa por el lado superior de las válvulas, y este movimiento se convierte en la salida del subcircuito del oscilador. Las flechas rojas punteadas ilustran los flujos a través de los canales de referencia, y este flujo controla el período de conmutación de las válvulas. Los dos flujos de solución representados por las flechas azul y roja no se mezclan debido a la capa intermedia de la membrana. P_{C1t} y P_{C2t} ($i = 1, 2$) son las presiones de la parte superior e inferior del capacitor i , respectivamente. (b) Perfil de presión teórica de P_{C1t} . P_i y P_o son presiones de entrada y salida del oscilador, respectivamente. Tomada de [13].

1.2.2 Sistemas microfluídicos basados en microgotas

Hemos visto la importancia que tienen los flujos pulsátiles en distintos sectores, como el industrial, biológico e inclusive en esta nueva ciencia que es la microfluídica, además de una serie de dispositivos, aparatos y equipos que de acuerdo con su funcionamiento son capaces de generar este tipo de flujo. En la presente tesis nos propusimos desarrollar un microchip que no necesite de equipos externos como son: válvulas, pistones, sistemas acústicos o bombas para hacer pulsar un fluido, ya que la mayoría de estos equipos suelen ser costosos o requieren de una construcción especializada.

En nuestro microchip utilizamos la técnica de microgoteo para formar pequeñas gotas dentro de los microcanales [14], las cuales crean un gradiente de presión haciendo que la interfase de estudio (agua-aceite o poliacrilamida-aceite) que se encuentra en un canal lateral empiece a pulsar u oscilar al pasar cada una de las gotas y con ello poder estudiar la dinámica de una interfase frente a un gradiente de presión oscilatorio.

En microfluídica, la generación de microgotas requiere dos cosas principalmente: a) dos fluidos inmiscibles que cuando entren en contacto sean capaces de formar microgotas y b) que la geometría de los microcanales dentro del chip permita la intersección de los fluidos inmiscibles. En esta tesis se utiliza agua destilada y aceite mineral para formar las gotas, y una geometría de enfoque de flujo para interceptar los dos fluidos inmiscibles. A continuación, se muestra una imagen de esta técnica tomada de [15]:

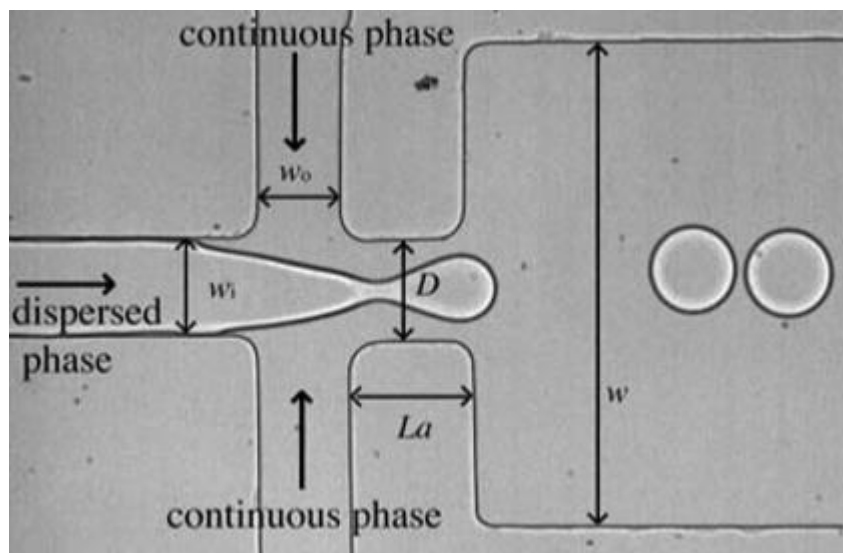


Figura 15. Producción de microgotas en un microdispositivo con una geometría de enfoque de flujo. La fase dispersa (agua) es comprimida por una fase continua (aceite) forzando a las microgotas a separarse de la fase continua. Tomada de [15].

La técnica de formación de microgotas en canales de microfluídica, ofrece la posibilidad de generar gotas con un alto grado de uniformidad en cuanto a volumen y forma de las mismas, si los flujos de los fluidos se mantienen constantes. Esta característica es muy importante en nuestros experimentos. Además, el tamaño homogéneo de las microgotas ha permitido utilizarlas para realizar reacciones químicas y biológicas dentro de ellas con un incremento en el rendimiento y reducción de los volúmenes de los reactivos, así como la oportunidad de contar con un ensayo individual por cada gota [14, 15].

2. Materiales y Métodos

2.1 Fabricación de microdispositivos de microfluídica por fotolitografía suave

La técnica más utilizada para fabricar los moldes de los microchips es la fotolitografía. Esta técnica se utiliza para el diseño de modelos en máscaras de capas delgadas y consiste en imprimir un patrón utilizando una máscara con el diseño sobre una base cubierta de un material sensible a la luz de cierta longitud de onda [16].

A continuación, se explica a grandes rasgos la fabricación del microchip de microfluídica (Figura 16). El paso 1, es tener una oblea de silicio. El paso 2, es cubrir la oblea con una fotoresina y luego exponerla a rayos UV utilizando una máscara oscura en la que sólo el diseño de los microcanales es transparente para que la luz pueda pasar a través de la máscara y polimerizar la resina. El paso 3 es la obtención del molde mediante el revelado de la resina (quedan solamente impresas las partes expuestas a la luz UV).

Una vez que se tiene el molde, se utiliza la técnica de litografía suave para fabricar el microdispositivo usando un polímero, el más común es el polidimetilsiloxano (PDMS). La fotolitografía suave tiene los siguientes pasos (Figura 16): El paso 4 es el vaciado de PDMS al molde. Después de que el PDMS ha polimerizado, sigue el paso 5 en donde se desprende el fragmento de PDMS donde se encuentra el microcanal. Finalmente, el paso 6 consiste en pegar el PDMS en una placa de vidrio [17].

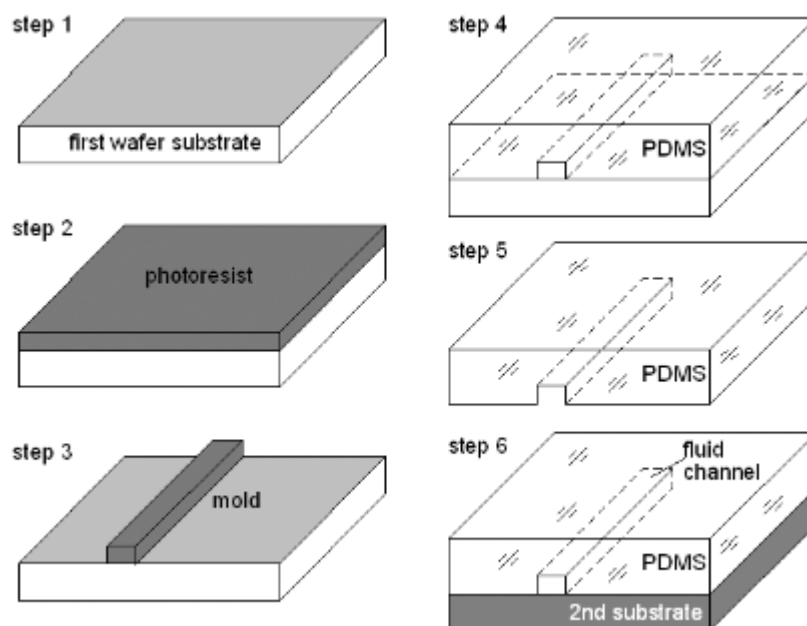


Figura 16. Procesos de fabricación de canales de microfluidos usando PDMS. Tomada de 17.

A partir de un molde se pueden fabricar varios microchips utilizando polidimetilsiloxano (PDMS), ya que ofrece muchas ventajas, tales como, transparencia óptica-esto facilita mucho los análisis de los flujos dentro de los microdispositivos-permeabilidad de los gases lo cual permite la eliminación de burbujas de gas que podrían afectar los análisis. Además, los microchips nos permiten realizar análisis rápidos y utilizar una menor cantidad de reactivos lo que implica una reducción de costos [17].

2.2 Diseño del microdispositivo

El diseño de los microcanales que conforman el microchip se realizó utilizando el software Adobe Illustrator C56 y se muestra a continuación:

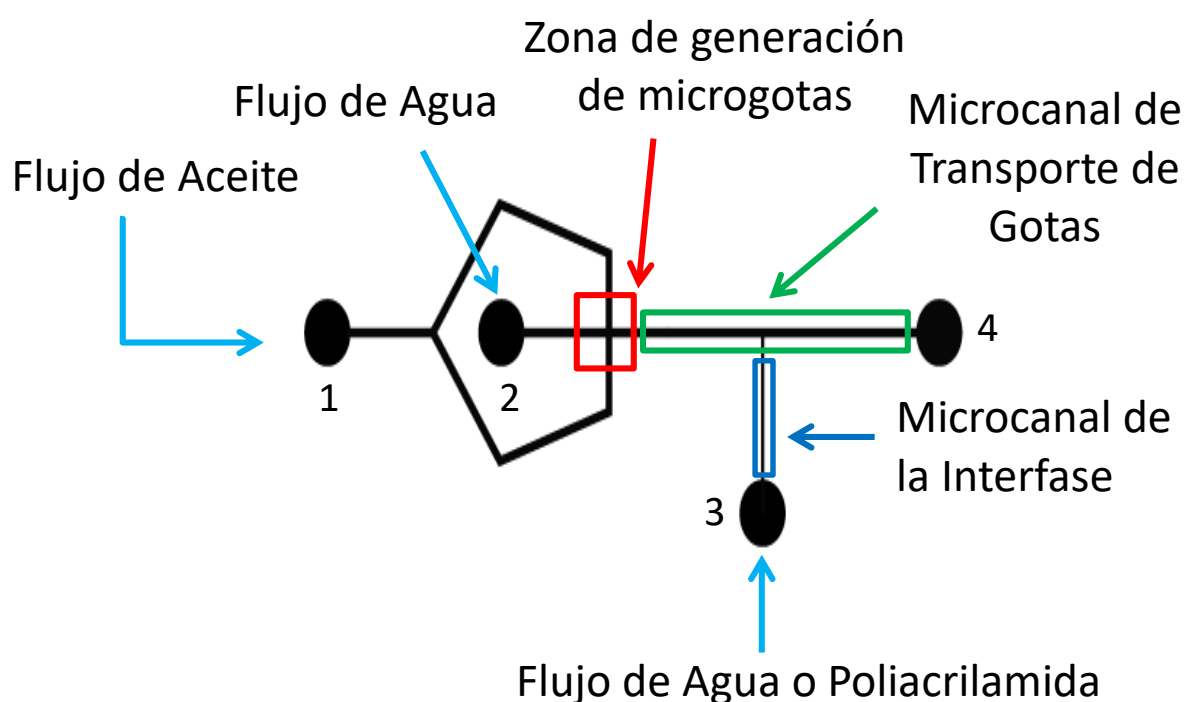


Figura 17. Diseño del microdispositivo realizado en Adobe Illustrator.

El diseño del microchip consta de un pentágono al cual están conectados los círculos 1 y 2 por medio de microcanales. El círculo 1 y 2 son los orificios por donde entrarán el aceite y el agua respectivamente. En la base del pentágono, el flujo de aceite intercepta al flujo de agua en la zona indicada con el cuadro rojo, esto hará que el flujo de aceite corte de manera repetida el flujo de agua llevando a la formación de microgotas de agua por medio del método de enfoque de flujo.

Una vez formadas las microgotas, estas recorrerán el microcanal de transporte de gotas (zona indicada con el rectángulo verde). Al final de este conducto se encuentra el círculo 4 por donde salen los residuos.

En medio del microcanal de transporte de gotas se encuentra el microcanal de la interfase (zona indicada con el rectángulo azul fuerte). Como su nombre lo indica, es el lugar donde estará situada la interfase, la cual se forma al ingresar por el círculo 3 agua o una solución acuosa de poliacrilamida. Ambas sustancias forman una interfase al contacto con el aceite ya que son inmiscibles.

Todos los microcanales se diseñaron con un ancho de 175 micras a excepción del microcanal de la interfase que tiene un ancho de 75 micras. La profundidad de todos los canales se diseñó para 80 micras.

2.3 Metodología de Fabricación de Moldes para Microchips por Fotolitografía Suave

- Una vez elaborado el dibujo del microchip, se imprimió en negativo sobre un acetato tamaño carta (Gráficos Digitales Denver). En la siguiente imagen se muestran los negativos recortados:

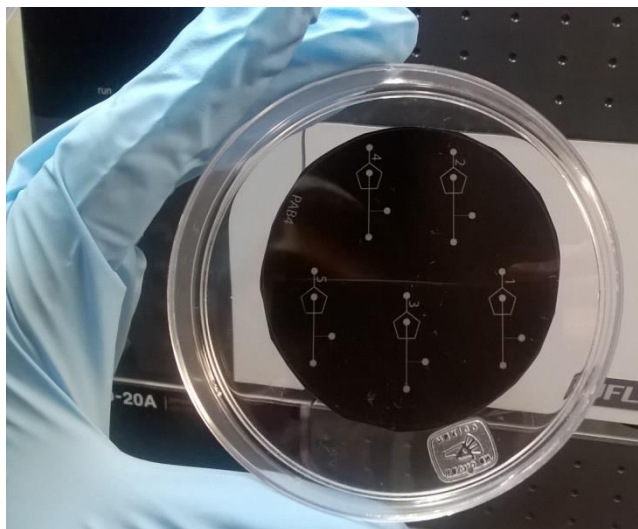


Figura 18. Recorte en forma circular de las impresiones en negativo.

- Para la elaboración de los moldes de los microchips se utilizó la resina fotosensible SU-8 3035 (Microchem), la cual fue sacada del refrigerador un día antes de la fabricación del molde para poder tenerla a temperatura ambiente al momento de trabajar.
- Antes de empezar la fabricación, nos cercioramos de que en nuestra área de trabajo solo hubiera luz amarilla ($\lambda > 550 \text{ nm}$), ya que luz de menor longitud de onda puede hacer reaccionar a la fotoresina. Es por ello que las ventanas y las lámparas fueron tapadas con papel celofán amarillo como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 19. Laboratorio donde fabricamos los microchips. En la imagen se muestran las ventanas cubiertas de papel celofán, lo que impide que la luz del pasillo se filtre al laboratorio.

- Se utilizó una oblea de silicio ($r = 3.81 \text{ cm.}$, Silicon Valley Microelectronics) como substrato para construir el molde del microchip. Para ello, la oblea se calentó durante 5 minutos a 210° C para eliminar la humedad y posteriormente se colocó en un horno por 5 minutos a 70° C , de esta forma se enfrió paulatinamente y se evitó un choque térmico.
- Cuando la oblea alcanzó la temperatura ambiente, se colocó dentro de un equipo de revestimiento por rotación (en inglés, spin coater).



Figura 20. Spin coater, es un equipo utilizado para la fabricación de moldes para sistemas microfluídicos construidos a partir de fotolitografía suave.

- Luego, se ingresó el siguiente programa al equipo:

| | | |
|------------------|----------------------|---------------------------|
| 1. tiempo = 10 s | Velocidad = 500 rpm | Aceleración = 100 rpm / s |
| 2. tiempo = 30 s | Velocidad = 1000 rpm | Aceleración = 300 rpm / s |

Enseguida se agregó la resina SU8 (3 mL) a la oblea de silicio, y se corrió el programa, provocando el giro de la oblea y la distribución homogénea de la resina por toda la superficie de esta.

- La oblea se sometió a un calentamiento en la parrilla durante 30 minutos a una temperatura de 105 ° C.
- Se dejó enfriar la oblea a temperatura ambiente.
- Sobre la mesa de trabajo se colocó un vidrio de 15 x 15 cm, encima de él la oblea y enseguida el negativo del diseño. Por último, se situó otro vidrio arriba del negativo formando una especie de “sándwich” que se muestra en la siguiente imagen:

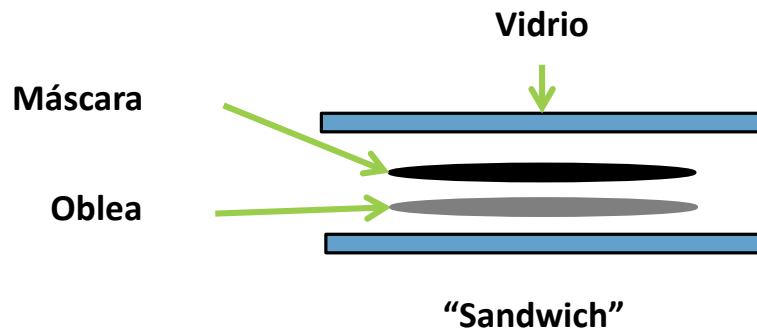


Figura 21. Formación del "sándwich".

- Formado el "sándwich" se expuso a los rayos de la lámpara UV (UVG-L25UV) durante 40 segundos, quedando el diseño plasmado en la oblea.
- Después de retirar los dos vidrios y el negativo, se realizó el proceso de cocinado colocando la oblea en la parrilla durante 5 minutos a 65 °C y luego a 95 °C durante 1 minuto para evitar un choque térmico, con esto podremos observar que el diseño ha quedado plasmado en la oblea.
- A la oblea se le añadió líquido revelador de SU-8 (1-metoxi-2-propanol acetato) para retirar la fotoresina que no se expuso al UV. Al agregar el revelador podemos ver si el diseño ha quedado adherido a la oblea, de lo contrario el diseño empezaría a desprenderse. Luego la oblea se enjuagó con isopropanol de forma abundante para eliminar los residuos de revelador.
- La oblea se secó con aire comprimido y se colocó en una caja Petri. Con este último paso se tiene listo el molde.

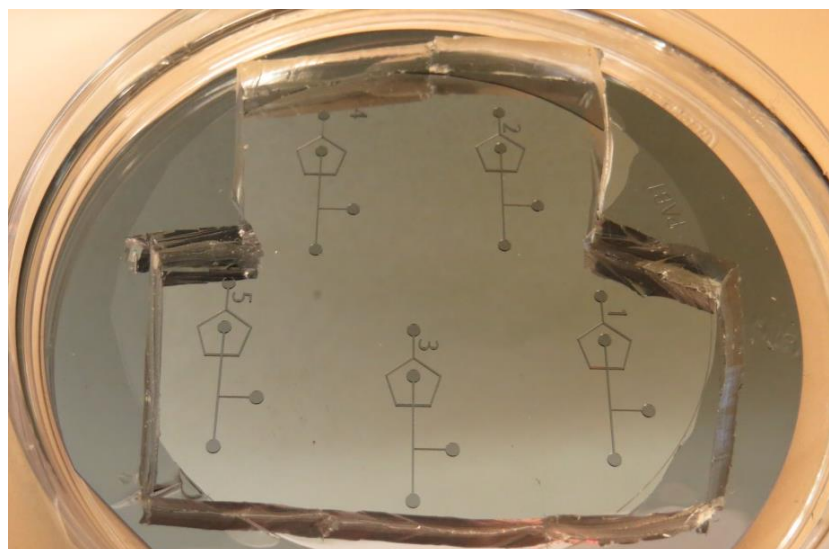


Figura 22. Molde Maestro.

2.4 Fabricación de Microchips

- El molde de los microchips se colocó dentro de una caja Petri y se cubrió con una mezcla de PDMS y agente curante de acuerdo con la siguiente descripción.
 - Se puso un vaso desechable de plástico sobre la balanza analítica y se llevó a cero. Posteriormente se le agregaron 20 gramos de polidimetilsiloxano (PDMS) (Sylgard 184, Silicone Elastomer base, Dow Corning), cantidad suficiente para llenar una caja Petri con un diámetro de 9 cm y un espesor de 1.5 cm. De inmediato se llevó la balanza a cero nuevamente y se añadieron 1.8 g de agente curante (Sylgard 184, Silicone Elastomer agent curing, Dow Corning). Esta cantidad de agente curante permite que el PDMS polimerice manteniendo su textura flexible.
 - Utilizando una cuchara de plástico se mezcló el PDMS y el agente curante durante 10 minutos.
- La mezcla PDMS-agente curante se agrega sobre el molde de microchip que está dentro de una caja Petri.
- La caja Petri se metió al desecador por 30 min para quitarle las burbujas y posteriormente se introdujo a un horno a 70 °C durante un día para una completa polimerización.

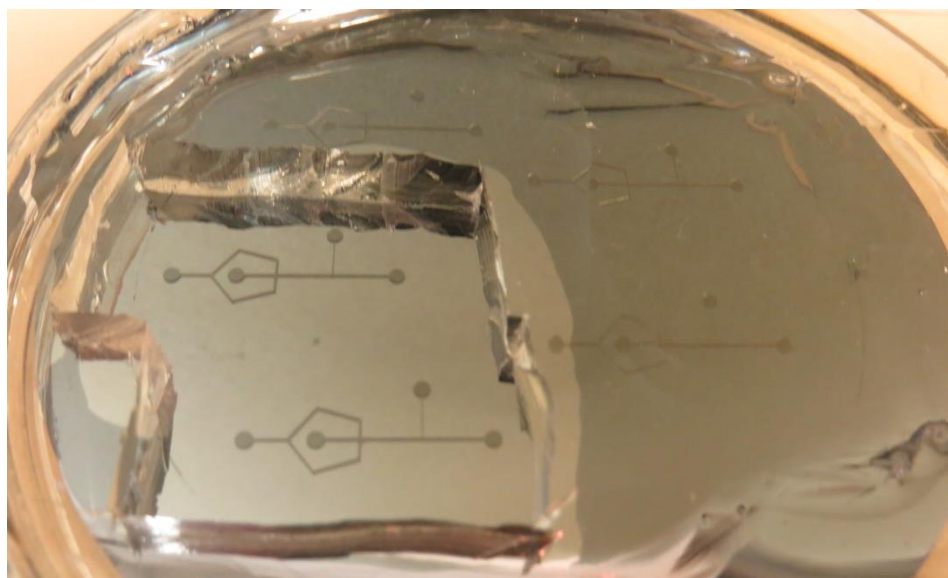


Figura 23. Molde maestro recubierto con la mezcla de PDMS ya polimerizado, donde se observa que dos microchips fueron recortados del molde.

- Para sellar el microchip, se utilizó un portaobjetos hecho de PDMS, el cual se fabricó de la siguiente manera:
 - Se coloca una oblea de silicio nueva (sin molde) dentro de una caja Petri.
 - Se prepara una mezcla de PDMS (15 g) y agente curante (1.4 g) en un vaso desechable y se cubre con ella la oblea dentro de la caja.
 - Después, la caja Petri se mete al desecador para eliminar las burbujas e inmediatamente se mete a la estufa a 70 °C durante un día.

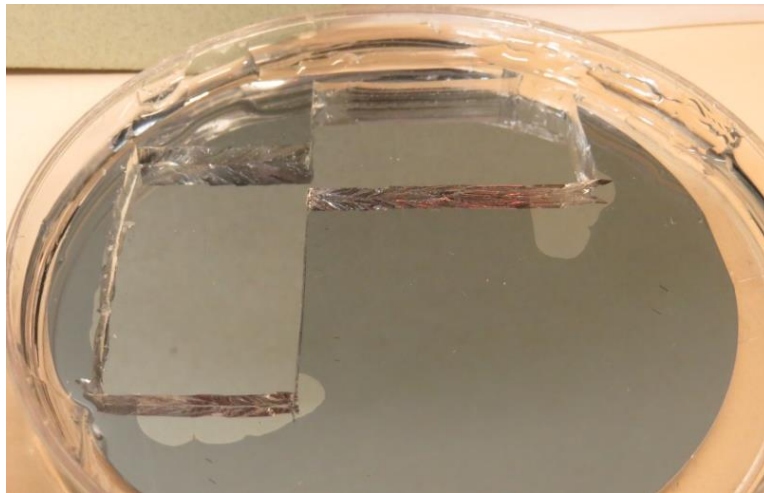
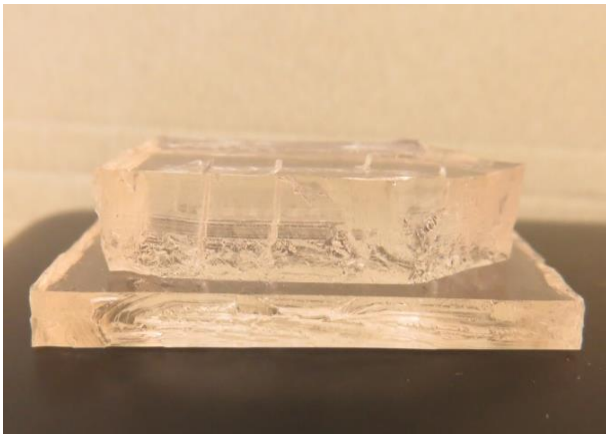


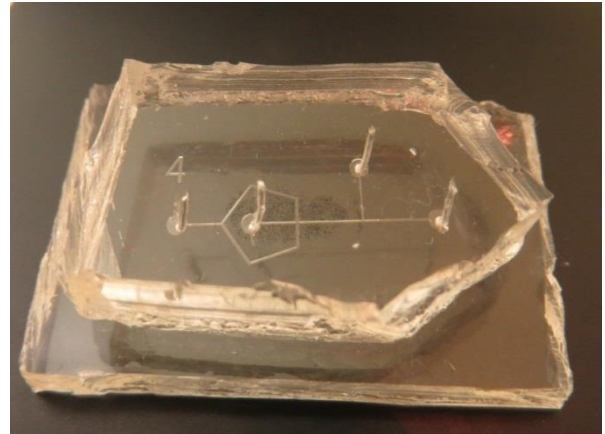
Figura 24. PDMS polimerizado en la caja Petri. Además, se observa que han sido recortados dos portaobjetos de PDMS.

- Al día siguiente, se sacan ambas cajas Petri del horno y de la caja Petri con el molde son recortados los microchips con el bisturí, teniendo cuidado de no cortar ningún diseño. Después son horadados los círculos que serán entradas y salidas de fluidos de cada microchip con un sacabocados de 0.75 mm de diámetro (Harris punch).
- Para hacer los portaobjetos de PDMS que servirán para sellar los microcanales, tomamos la otra caja Petri que no tiene diseños en el PDMS y con ayuda del bisturí recortamos unos rectángulos del mismo tamaño que los microchips.

- Por último, se pegan los microchips a los portaobjetos de PDMS usando un tratamiento de plasma (Corona Treater, BD-20AC, Electro-technic Products). Primero se hace pasar una descarga para generar plasma en la superficie de todos los canales del microchip durante 15 segundos. Después, pasamos la descarga para generar plasma por toda la superficie plana de los portaobjetos de PDMS durante 15 segundos y se ponen en contacto las dos superficies. Se hace un poco de presión, se mete al horno y al siguiente día los microchips están listos para realizar experimentos.



A)



B)

Figura 25-A) Se observan el portaobjetos de PDMS y el microchip de PDMS pegados después de haber hecho el tratamiento de plasma.

Figura 25-B) Se observan los microcanales que conforman nuestros microchips y los orificios por donde entran los fluidos.

2.5 Caracterización de los Microchips (Determinación experimental del ancho y alto de los microcanales)

Para la caracterización de los microchips se hizo lo siguiente:

- Se recubrió con la mezcla de PDMS y agente curante la caja Petri con el molde.
- Después de haber estado en el horno, se sacó la caja Petri y de los 5 microchips que consta nuestro molde solo se recortó el microchip 4, ya que es el microchip con el que realizamos todos los experimentos.
- Se tomó el microchip 4 y se le realizaron 3 cortes transversales al microcanal de la interfase en distintas zonas de este. Estos cortes se giraron 90° y se fotografiaron con ayuda de un microscopio y una cámara de video. En las siguientes imágenes se observan unas fotografías del perfil del microcanal de la interfase donde se puede determinar su altura y ancho:

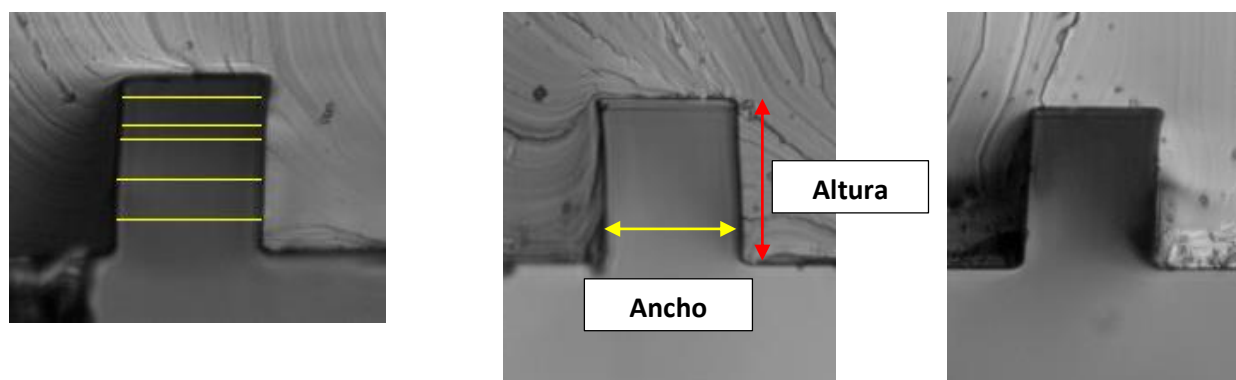


Figura 26. Las 3 fotos son recortes que se hicieron en el microcanal de la interfase. En la foto de la izquierda, las líneas amarillas representan las mediciones que se hicieron del ancho del microcanal.

- La altura y el ancho de los microcanales de la interfase se determinó con el programa ImageJ (National Institutes of Health).
- Este mismo proceso se repitió dos veces.
- Las mediciones de ancho y altura son promediadas obteniendo los siguientes valores:

$$\text{Ancho} = 73 \pm 1 \mu\text{m} \quad \text{Altura} = 83 \pm 1 \mu\text{m}$$

2.6 Fluidos

- *Disolución de Aceite Mineral con 1.8 % m/m de Span 80.* Para su elaboración se pesaron 15.2 g de Aceite mineral Q. P. (Marca: Reactivos y Productos. Gravedad Específica: 0.845 – 0.905. Viscosidad a 40 °C: 34.5 cSt,) y después se le añadieron 0.28 g del surfactante no iónico Span 80 (SIGMA, monoleato de sorbitan).
- *Disolución de Agua Destilada con 0.64 % m/m de colorante artificial para alimentos.* Para su elaboración se pesaron 25 g de Agua Destilada (Millipore) y se le agregaron 0.16 g de colorante vegetal artificial (McCormick).
- *Disolución acuosa de poliacrilamida con una concentración de 1.04 mg/mL.* Para su elaboración se pesaron 0.00104 g de Poliacrilamida (Polysciences, MW \approx 9,000,000) a los cuales se les agregó 1 mL de agua desionizada (Millipore).

2.7 Adquisición de videos

Para la obtención de los videos, usamos un microscopio invertido (Leica DM IL LED) y una cámara de alta velocidad Phantom (Miro M110, AMETEK) que se encuentra montada en el microscopio.

La velocidad a la que fueron tomados los videos dependía de los flujos de agua y aceite con los que formábamos las microgotas. Conforme aumentábamos los flujos, también aumentábamos la velocidad de grabación.

Con esto pudimos analizar claramente las oscilaciones de la interfase, así como el paso de las gotas que la hacían oscilar. Esto sirvió para comprobar que el número de oscilaciones era igual al número de gotas que cruzaban por el microcanal de la interfase.

A continuación, mostramos las características que tienen nuestros videos, así como una tabla que relaciona la cantidad de flujo de agua y aceite con la velocidad del video.

Resolución de los videos: 320 X 800 pixeles

Objetivo del microscopio: 10x

Tabla 1. Relación entre los flujos de agua y aceite que forman las microgotas con la velocidad del video para los experimentos de la interfase agua-aceite.

| Flujos para formar las microgotas ($\mu\text{L/h}$): | | Velocidad del video (cuadros por segundo) | Frecuencia de las Gotas (rad/s) |
|---|------|--|---------------------------------|
| Aceite | Agua | | |
| 100 | 100 | 24 | 20.3 |
| 300 | 300 | 70 | 70.8 |
| 400 | 400 | 80 | 98.1 |
| 500 | 500 | 100 | 130.9 |
| 600 | 600 | 150 | 178.8 |
| 800 | 800 | 300 | 284.5 |
| 1000 | 1000 | 400 | 389.7 |
| 1200 | 1200 | 400 | 566.3 |
| 1300 | 1300 | 400 | 616.8 |
| 1500 | 1500 | 500 | 759.5 |

Tabla 2. Relación entre los flujos de agua y aceite que forman las microgotas con la velocidad del video para los experimentos de la interfase poliacrilamida-aceite.

| Flujos para formar las microgotas ($\mu\text{L/h}$): | | Velocidad del video (cuadros por segundo) | Frecuencia de las Gotas (rad/s) |
|--|----------------|--|---------------------------------|
| Aceite | Poliacrilamida | | |
| 100 | 100 | 24 | 22.3 |
| 300 | 300 | 70 | 78.1 |
| 400 | 400 | 80 | 104.9 |
| 470 | 470 | 90 | 135.6 |
| 490 | 490 | 90 | 142.8 |
| 500 | 500 | 100 | 139.7 |
| 530 | 530 | 130 | 159.6 |
| 570 | 570 | 130 | 169.2 |
| 600 | 600 | 150 | 170.6 |
| 700 | 700 | 200 | 216.5 |
| 800 | 800 | 300 | 240.4 |
| 1000 | 1000 | 400 | 309.2 |
| 1200 | 1200 | 400 | 524.3 |
| 1300 | 1300 | 400 | 628.3 y 467.2 |
| 1500 | 1500 | 500 | 788.6 |
| 1700 | 1700 | 600 | 886.4 |
| 1800 | 1800 | 600 | 939.3 |
| 2000 | 2000 | 600 | 1120.3 |

2.8 Análisis de los videos en Tracker

Los videos que muestran las oscilaciones de la interfase fueron analizados con el software Tracker (Brown, D. TRACKER: Video Analysis and Modeling Tool, versión 4.94; 2016. <http://physlets.org/tracker/> (Retrieved October 13, 2016). A continuación, se muestra una imagen del software en funcionamiento:

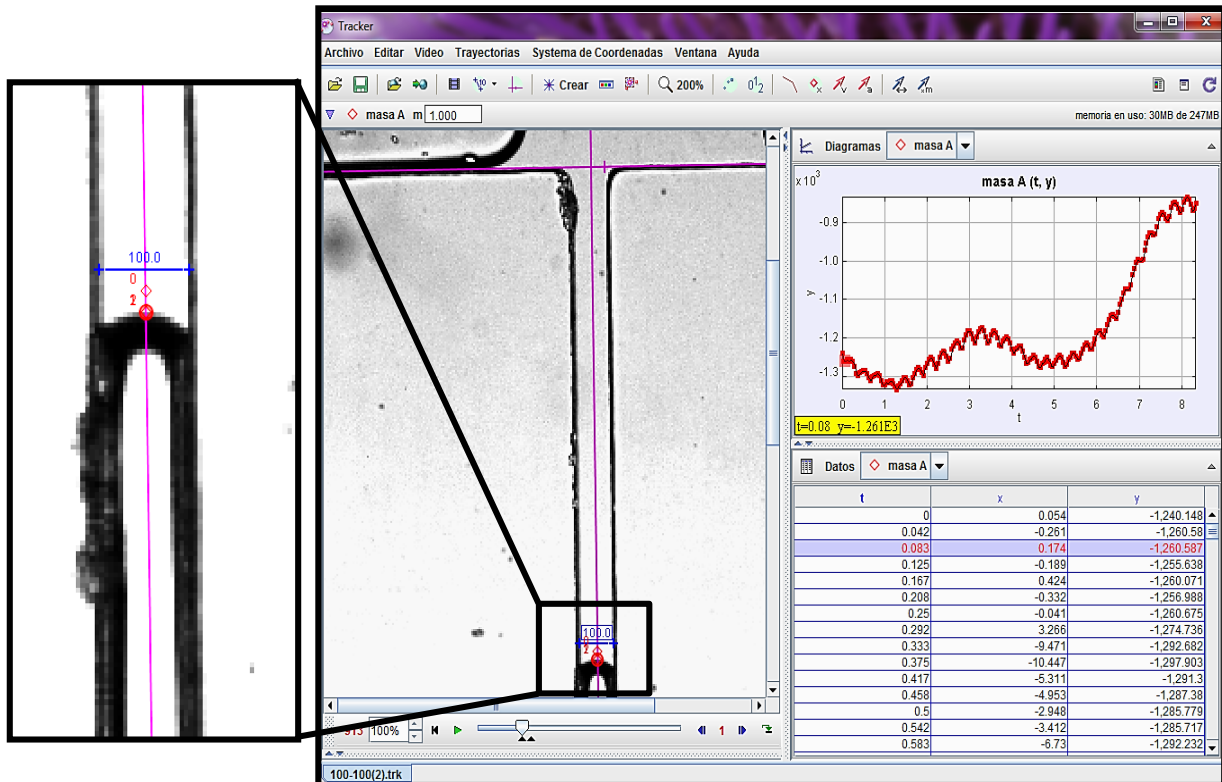


Figura 27. Software de Análisis de Video: Tracker.

Para el análisis de los experimentos se requiere lo siguiente:

- Se elige el intervalo del video que queremos analizar. Después se insertan los siguientes datos: el tiempo inicial en el que se realizara el análisis (el tiempo inicial para todos los videos fue cero) y los cuadros por segundo en el que fue tomado el video.
- Se coloca un eje de coordenadas en el inicio del microcanal de la interfase (en la Figura 27 el eje de coordenadas está dado por las líneas de color rosa), de tal manera que la interfase se moverá en la parte negativa del eje Y.

- Se pone una línea de calibración a lo largo de alguna dimensión conocida del microcanal, en este caso el ancho (en la Figura 27 es la línea de color azul), esta línea nos permitirá convertir las unidades de pixeles que maneja el programa a micrómetros.
- Con ayuda de una “masa puntual” (punto de color rojo) elegimos la zona que queremos analizar de la interfase. En todos los experimentos la zona que analizamos fue la punta de la interfase.
- Una vez que creamos la masa puntual, se abre una ventana que llevará por nombre: “Autotracker: masa A posición”. En esta ventana damos click al botón de “Search”, de tal manera que el punto rojo seguirá la posición de la interfase a través del intervalo de video que se eligió.

Con en este análisis obtenemos datos de la posición de la interfase (en pixeles) en función del tiempo y el programa elabora la gráfica de posición vs tiempo (esta gráfica se observa en la parte superior derecha de la Figura 27).

Para cambiar los datos de la posición de la interfase que están en pixeles a micrómetros se utilizó la relación entre el ancho del microcanal de la interfase (73 μm) con la línea de calibración del software (100 pixeles).

Ejemplo: Si obtenemos un dato de 80 pixeles, por medio de una regla de tres obtenemos su valor en micras:

$$\begin{array}{l}
 100 \text{ pixeles} = 73 \mu\text{m} \\
 80 \text{ pixeles} = 58 \mu\text{m} \quad \frac{80 \text{ pixeles} \times 73 \mu\text{m}}{100 \text{ pixeles}} = 58.4 \mu\text{m} \approx 58 \mu\text{m}
 \end{array}$$

Este método se utilizó para obtener los datos de la posición de la interfase en micras para todos los experimentos.

3. Diseño experimental

3.1 Diseño del microdispositivo

Se diseñó y se fabricó un microdispositivo de PDMS capaz de generar microgotas por el método de enfoque de flujo, el cual consiste en introducir dos fluidos inmiscibles (agua y aceite) de manera continua por microcanales distintos y hacerlos coincidir en una intersección. Ahí, el flujo del aceite corta el del agua y causa la formación de las microgotas de agua (Figura 28).

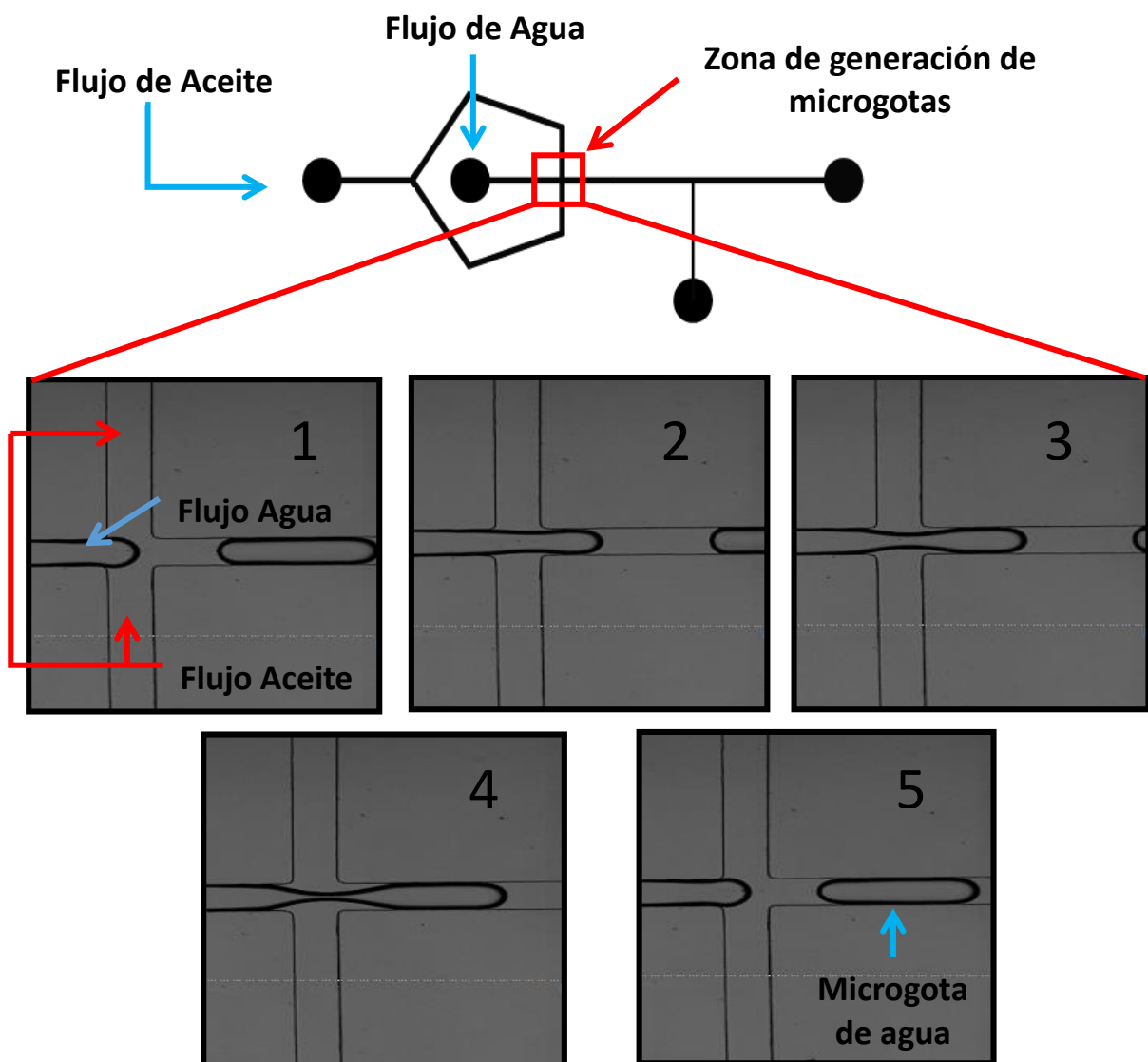


Figura 28. Imágenes que describen el método de enfoque de flujo utilizado para la generación de las microgotas. En el dibujo del microchip están indicados los orificios por donde entra el agua y el aceite, así como el cuadrado de color rojo que marca la zona en donde se producen las microgotas. Secuencia de imágenes que nos muestra a detalle la formación de una microgota, en donde el flujo de agua es interceptado por el flujo de aceite, forzando al flujo de agua a separarse en una gota.

Las microgotas formadas avanzan por un microcanal de 0.9 cm de largo al que llamamos microcanal de transporte de gotas que se muestra en la siguiente imagen:

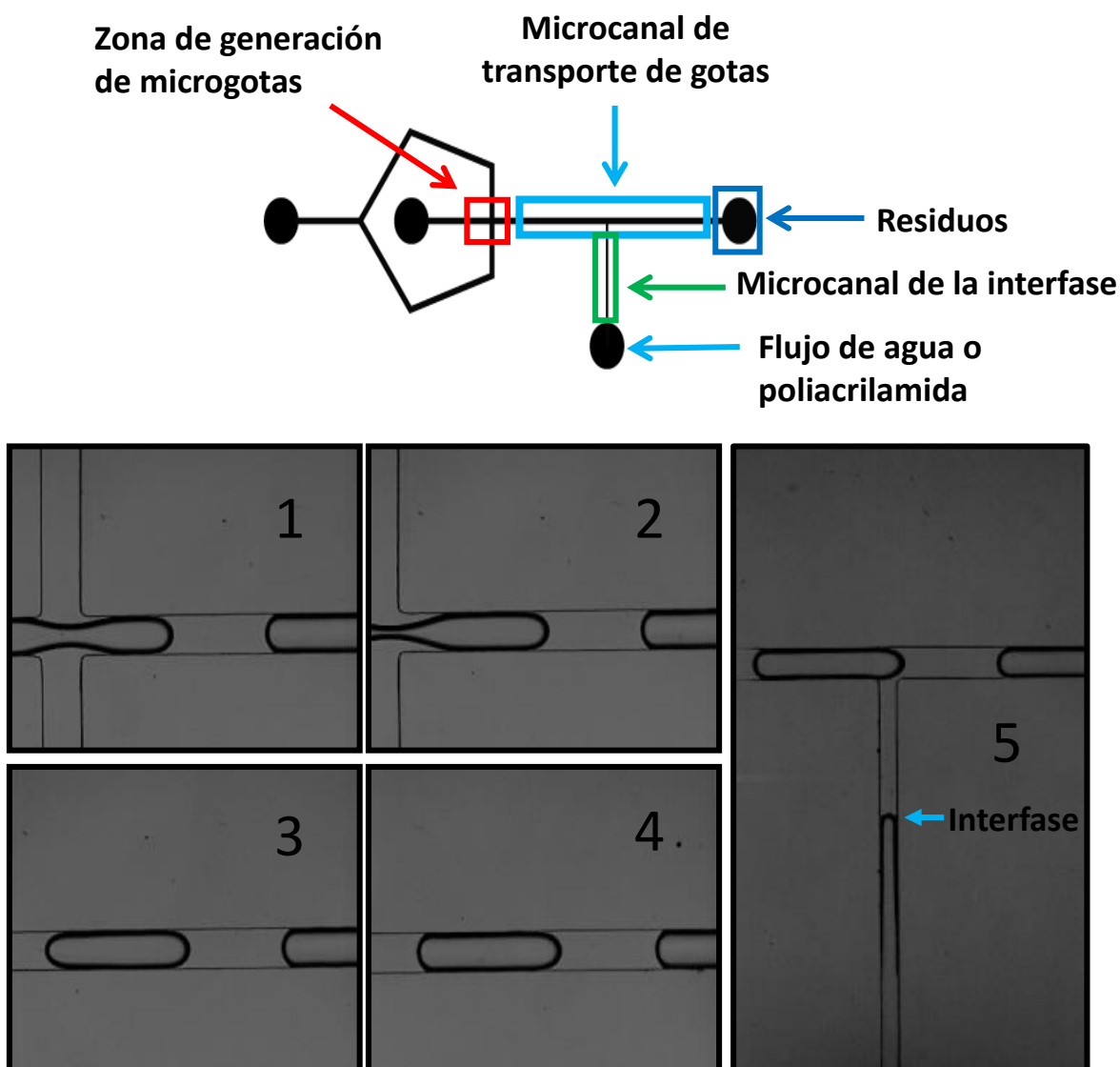


Figura 29. Secuencia de imágenes del trayecto que realizan las microgotas en el microchip. Después de formarse, cada microgota recorre el microcanal de transporte de gotas (rectángulo azul) hasta cruzar el microcanal de la interfase (rectángulo verde) en donde hará pulsar a la interfase. Después continúa su camino por el microcanal de transporte hasta su salida por el orificio de residuos situado a la derecha del chip.

A la mitad del microcanal de transporte de gotas se encuentra una intersección con un segundo canal al que llamamos microcanal de la interfase, en el cual se introduce un segundo fluido inmiscible con el aceite para formar una interfase que será objeto de estudio en este trabajo (Recuadro 5 en Figura 29).

Cuando existe un flujo de gotas en un microcanal, la caída de presión a lo largo del canal no es lineal, como ocurre con un fluido de una sola fase, sino que la presión cambia en pasos discretos por efecto de cada una de las gotas presentes [15]. Lo descrito anteriormente se observa en la siguiente imagen:

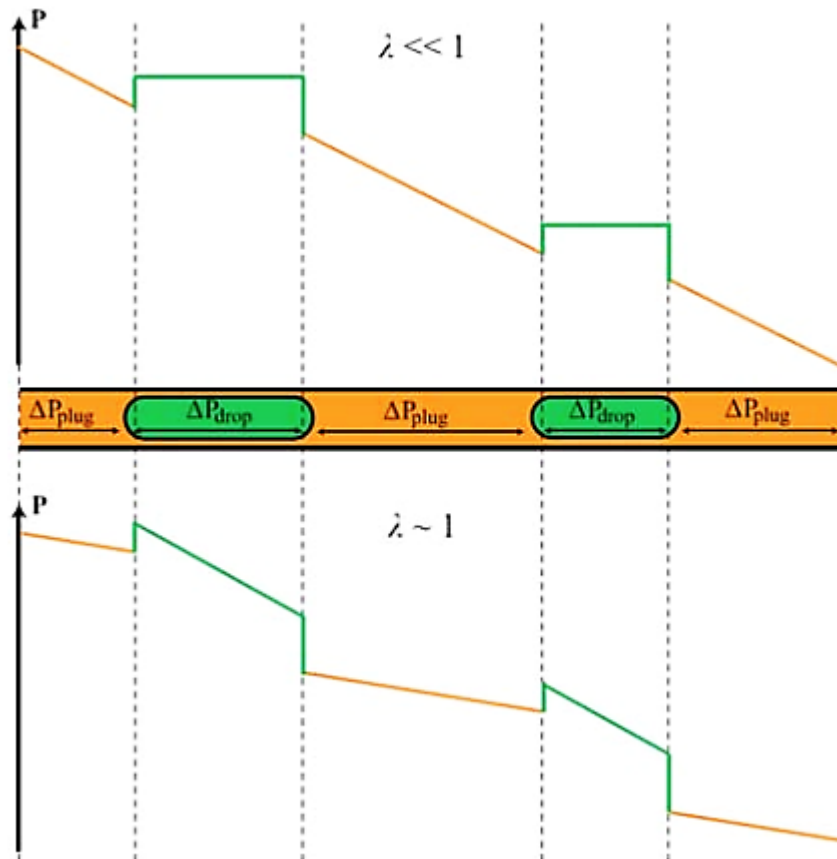


Figura 30. Gráfico cualitativo de la presión a lo largo de un microcanal que contiene gotas: (Arriba) Se muestra el caso de gotas invíscidas. (Abajo) Se muestra el caso de gotas viscosas. Tomada de [15].

Este fenómeno será utilizado en este trabajo para que cuando una microgota pase por la entrada del canal donde está la interfase, se genere un aumento de presión que haga retroceder a la interfase y que cuando la gota termine de cruzar la presión disminuya haciendo regresar a la interfase a su posición inicial. El repetido paso de las microgotas generará una oscilación constante en la interfase de acuerdo con la frecuencia de generación de las microgotas. Con ayuda de una cámara de video de alta velocidad pudimos grabar tal fenómeno. Más adelante, se muestran unas secuencias de imágenes en donde se observa cómo oscila la interfase.

3.2 Elección de fluidos

En nuestros experimentos se estudiaron dos interfases con diferentes componentes cada una: la primera se formó con agua y aceite mineral, siendo las dos sustancias

fluidos newtonianos. La segunda interfase se formó con una solución acuosa de poliacrilamida (P.M. ≈ 9000000 g/mol, Concentración: 1.04 mg/mL) y aceite mineral. En este caso, el aceite es un fluido newtoniano pero la poliacrilamida es un fluido viscoelástico [18]. De acuerdo con la naturaleza de los fluidos que conforman las interfases, podremos estudiar:

- La dinámica de ambas interfases frente a un gradiente presión creado por las microgotas.
- La curvatura que muestra la interfase dentro del microchip de PDMS.
- Los perfiles de velocidad y números de Womersley que desarrollarán los fluidos que componen las interfases.

En capítulos posteriores se explica lo obtenido para cada uno de estos puntos.

3.3 Introducción del fluido que forma la interfase con el aceite

En nuestros experimentos, se emplearon dos sistemas para introducir el agua y la poliacrilamida al canal de la interfase en el microchip:

3.3.1 Sistema 1: Columna de agua

Una vez que las microgotas habían sido formadas en el chip y fluían por el canal de transporte, se conectó al canal de la interfase una columna abierta llena de agua. Por medio del ajuste de la altura de la columna, la presión hidrostática del agua en el chip se puede variar (Figura 33) permitiendo que el agua entre al microchip y forme la interfase.

Para facilitar este procedimiento, la columna con agua se puso a una altura tal que el agua llenara el canal de la interfase y empezara a “derramar” gotas de agua en el canal de transporte. Después de disminuir paulatinamente la altura de la columna, la interfase agua-aceite retrocedía unos cientos de micras desde la parte superior del canal de la interfase hasta llegar a la zona de estudio (Figura 29 panel 5 y Figura 35).

En ese momento se puede considerar que la presión en la interfase es muy cercana a la que tiene el aceite en el canal de transporte y solamente cuando pasa una microgota la interfase oscila debido al cambio de presión que genera el paso de la gota (Ver figura 30).

En nuestro sistema, las microgotas siempre se generaron utilizando una relación 1:1 entre el flujo de aceite y el flujo de agua. Así, al incrementar los flujos aumentaba la frecuencia de producción de microgotas y con ello se pudo estudiar cómo el aumento de la frecuencia afecta la dinámica de la interfase. Para cada frecuencia más alta, había que aumentar los flujos de entrada de agua y aceite y con ello la presión en el canal de transporte, de tal forma que había que subir la columna con agua para cada experimento con una frecuencia superior para poder mantener a la interfase en el área de estudio.

Este sistema sólo se utilizó para los experimentos con la interfase agua-aceite.

Limitaciones: Aunque el sistema arriba mencionado funcionó muy bien, tiene como limitante que la altura máxima de la columna que se puede utilizar en el laboratorio es de 139 cm. La frecuencia más alta de las gotas que se puede alcanzar a esta altura es de 227.7 rad/s (36.24 Hz). En la siguiente gráfica se muestra la relación que hay entre la altura de la columna y la frecuencia de gotas:

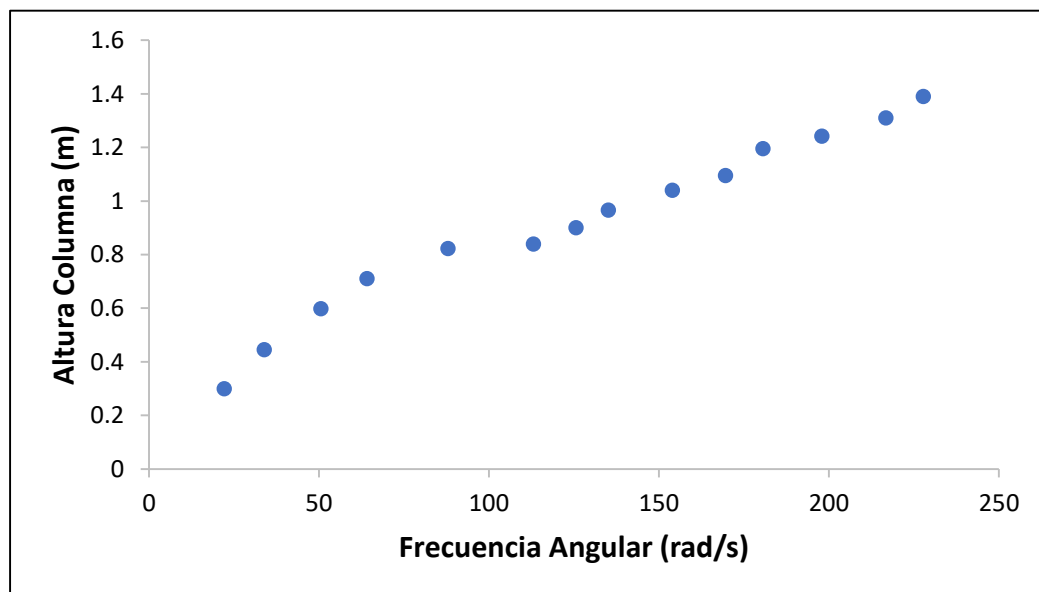


Figura 31. Altura de la Columna vs Frecuencia Angular.

Con los datos de altura de la columna fue posible calcular la presión hidrostática dentro del canal de la interfase. La siguiente gráfica nos muestra que conforme aumentamos la frecuencia angular, la presión hidrostática aumenta.

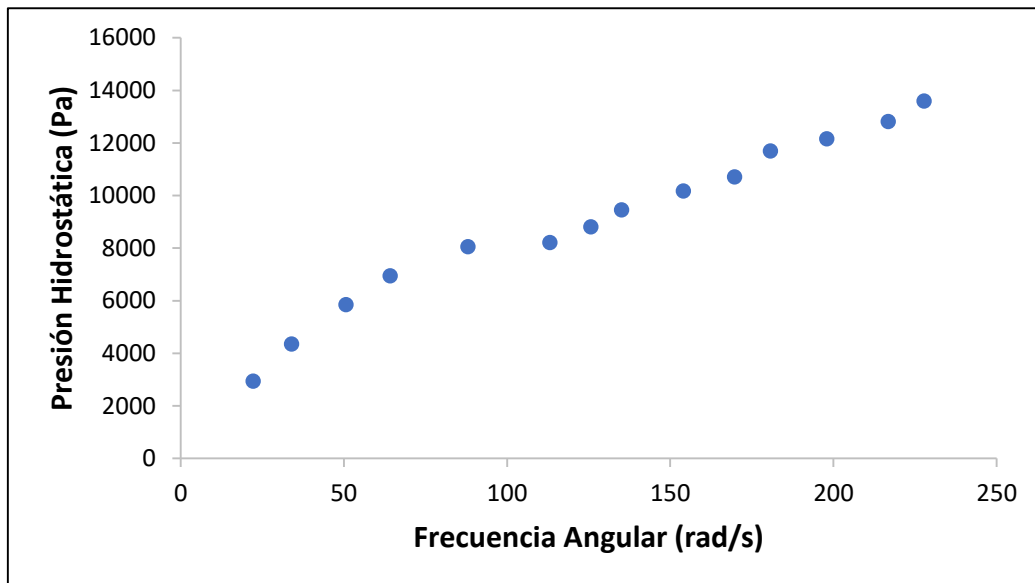


Figura 32. Presión Hidrostática vs Frecuencia Angular.

3.3.2 Sistema 2: Tercera Bomba

En esta configuración, una vez que las microgotas han sido formadas, se hace ingresar agua con ayuda de una tercera bomba para jeringas al interior del microchip por el microcanal de la interfase (Figura 34) formando así la interfase agua-aceite.

Al inicio, esta bomba tiene un flujo mayor al que tienen las bombas que introducen el agua y el aceite que forman las microgotas. Esto le permite al agua en el microcanal de la interfase desplazar al aceite que ha llenado este canal hasta llevarlo al microcanal por donde pasan las microgotas. Al observar que el flujo del agua invade el microcanal de las microgotas, poco a poco vamos disminuyendo el flujo de la bomba hasta hacerlo cero, esto le permite a la interfase agua-aceite regresar al microcanal de la interfase. En ese momento se puede considerar que la presión en la interfase es muy cercana a la que tiene el aceite en el canal de transporte y solamente cuando pasa una microgota la interfase oscila debido al cambio de presión que genera el paso de la gota (Ver figura 30). Cuando la interfase oscila dentro del área de estudio se toman los videos.

Con este arreglo, también se utilizó una relación 1:1 en el flujo de agua y de aceite para formar las microgotas. Así, al incrementar los flujos se incrementó la frecuencia de

producción de microgotas y con ello se pudo estudiar cómo el aumento de la frecuencia afecta la dinámica de la interfase. Los experimentos con este segundo arreglo abarcaron desde 20.3 rad/s (3.2 Hz) hasta 759.5 rad/s (120.9 Hz).

Debido a que el rango de frecuencias que se pueden imponer con este nuevo sistema 2, es tres veces mayor que el que se puede imponer con el sistema 1 (columna abierta), se decidió utilizar el sistema 2 para todos los experimentos reportados en la sección de resultados y discusión, incluyendo los experimentos con la interfase de poliacrilamida-aceite.

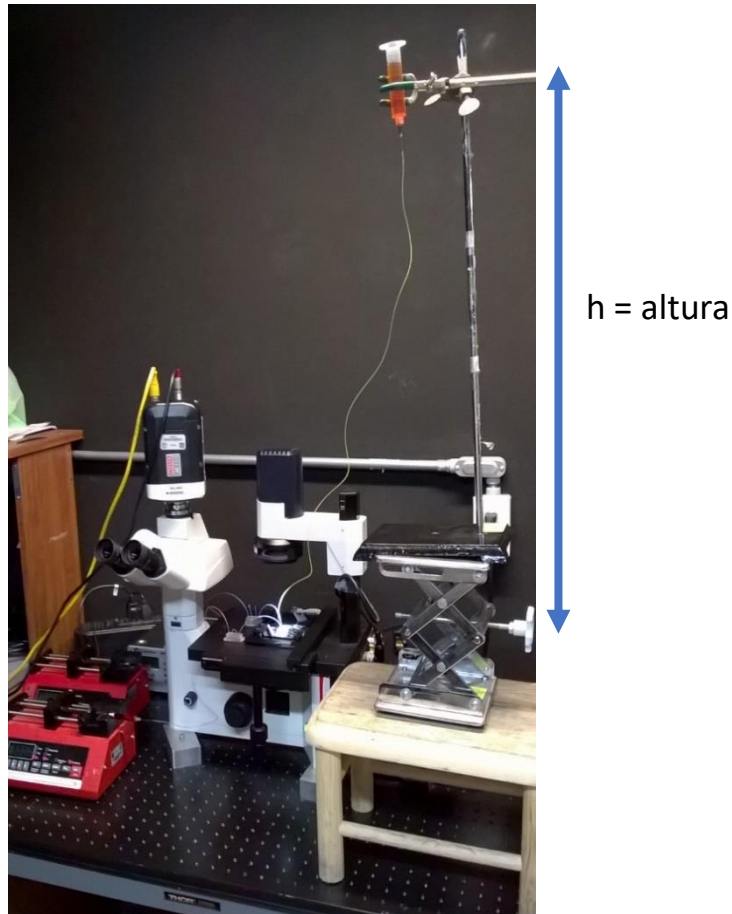


Figura 33. Sistema 1: En el centro del microscopio se encuentra nuestro microchip y del lado izquierdo de la imagen se muestran las bombas para jeringa que introducen los fluidos (agua y aceite) con los cuales se forman las microgotas que harán pulsar la interfase. El canal de la interfase se encuentra conectado a una columna que está situada al lado derecho de la imagen, y que nos permite llenar el microcanal de la interfase con agua destilada que contiene 0.64 % m/m de colorante artificial para alimentos, y así formar la interfase agua-aceite. Arriba de los oculares se localiza nuestra cámara de video de alta velocidad que nos permite grabar los experimentos. Por último, del lado derecho se indica la altura que tiene la columna de agua.



Figura 34. Sistema 2. En el centro del microscopio se encuentra nuestro microchip, las bombas para jeringa que se encuentran en la parte baja de la imagen introducen los fluidos (agua y aceite) con los cuales se forman las microgotas que harán pulsar la interfase. El canal de la interfase se encuentra conectado a una bomba que se sitúa al fondo de la imagen, y que nos permite llenar el canal con agua o poliácridamida, con la cual podremos formar la interfase. Por último, junto al cable amarillo se localiza nuestra cámara de video de alta velocidad que nos permite grabar los experimentos.

3.4 Zona de estudio en el Microcanal de la interfase:

Los experimentos dentro del microcanal de la interfase se realizaron en el intervalo que se muestra la Figura 35.

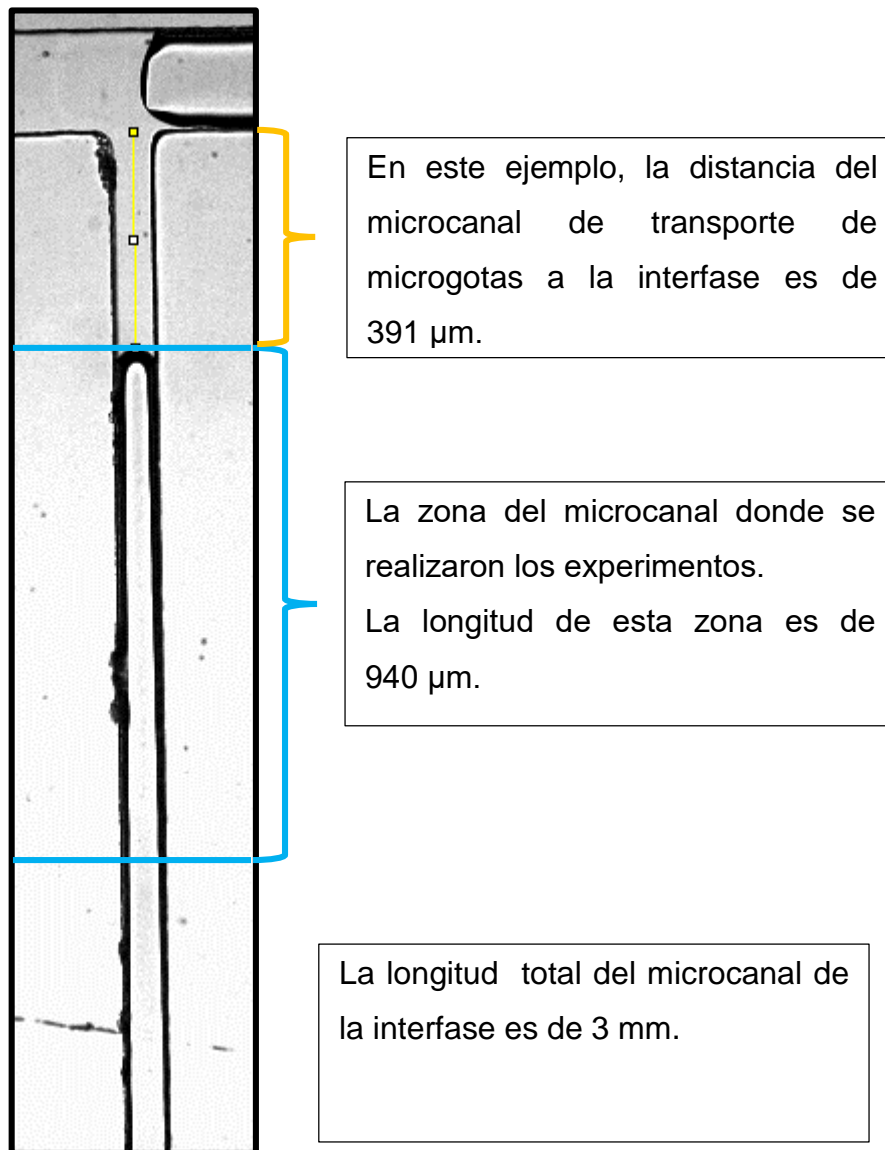


Figura 35. Zona del microcanal de la interfase en la que se realizaron los experimentos.

Durante un experimento, la interfase tenía un desplazamiento global, es decir, se alejaba y se acercaba al canal de transporte, mientras oscilaba con la misma frecuencia del paso de gotas. Para facilitar el estudio de las oscilaciones de la interfase causadas por los cambios de presión debidas al paso de gotas, todos los experimentos fueron grabados cuando la interfase se movía dentro de una misma zona (indicada en color azul en la Figura 35).

4. Tratamiento de Datos

Después de obtener los datos de tiempo y de posición de la interfase por medio del análisis de los videos en Tracker, usamos un programa elaborado en Mathematica para hacer el análisis de datos y trazar las gráficas de posición vs tiempo de todos los experimentos, como la que se muestra a continuación.

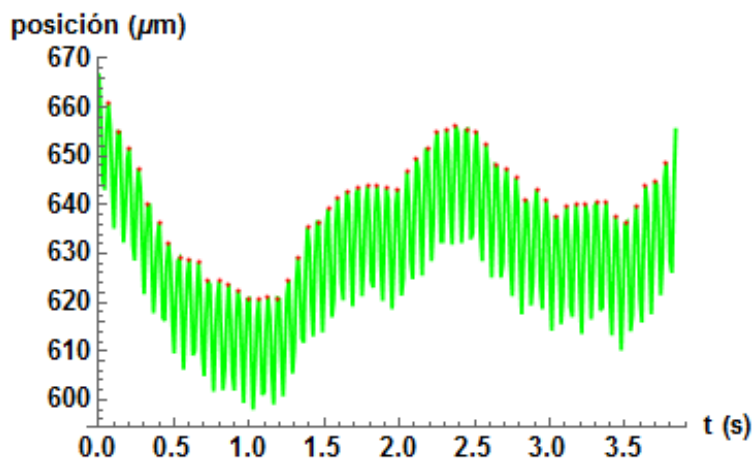


Figura 36. Grafica de posición vs tiempo.

El tratamiento de datos consistió en los siguientes pasos:

1. Sobre los mismos datos de la gráfica de la Figura 36, se obtuvo una tendencia global de la posición de la interfase en este ejemplo (línea rosa).

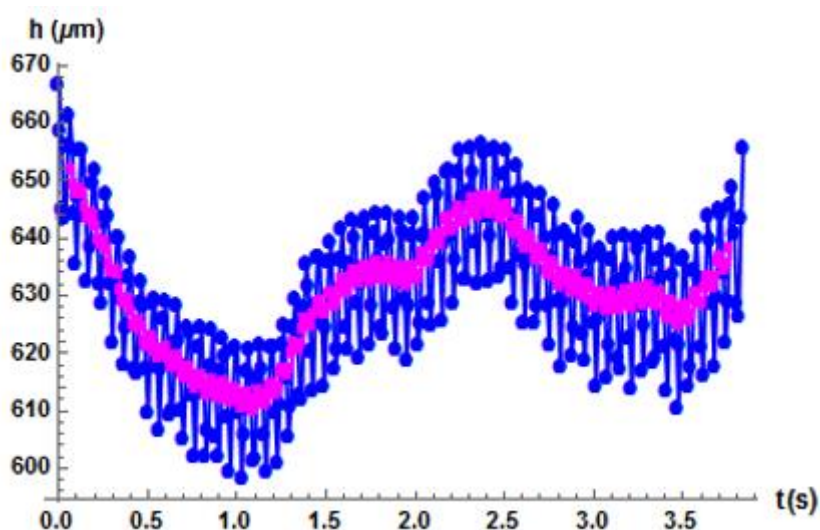
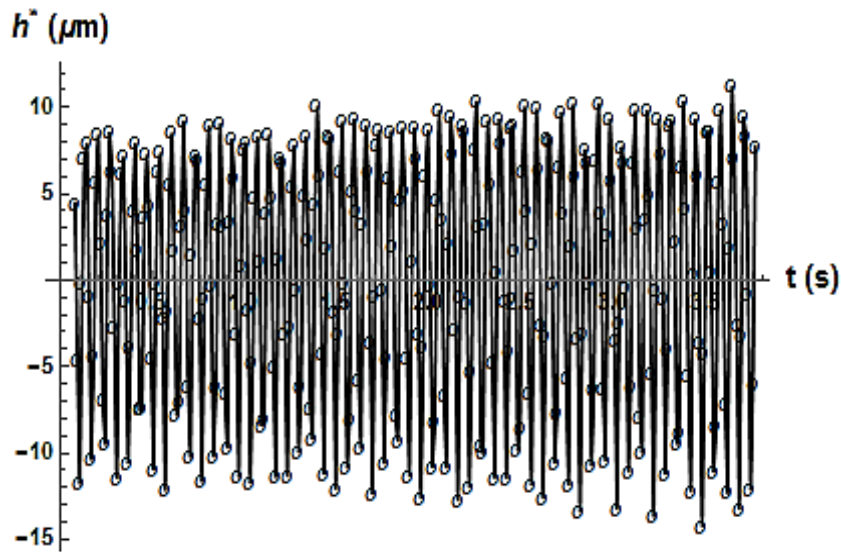


Figura 37. Construcción de la línea de tendencia (línea de color rosa) sobre los datos de posición vs tiempo de la Figura 36.



2. A los datos de posición se le restó la tendencia, por lo que los nuevos datos de posición, h^* , oscilan alrededor de cero.

Figura 38. Gráfica de posición* vs tiempo que resulta de la resta de los datos de posición de la Figura 37 menos los datos de la tendencia.

3. Por último, a los datos de la gráfica anterior se les aplica la Transformada de Fourier y se obtiene la siguiente gráfica:

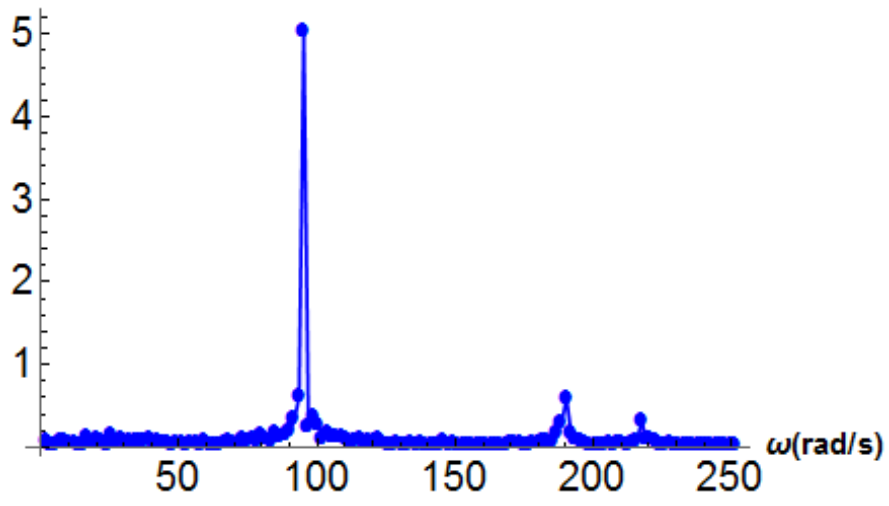


Figura 39. En esta gráfica, el pico más alto representa la frecuencia angular predominante en el movimiento oscilatorio de la interfase para este experimento.

Debido a la convención de parámetros que usamos, cuando se hace la transformada de Fourier, la altura del pico que se obtiene corresponde a la mitad de la amplitud de las oscilaciones de la interfase en el dominio del tiempo. Por lo que la altura del pico más alto se multiplicó por 2 para obtener la amplitud de oscilación de la interfase de este experimento.

Este mismo método se utilizó para obtener la frecuencia angular y amplitud de los experimentos de ambas interfases.

Posteriormente, se determinó la frecuencia promedio y la amplitud promedio de las oscilaciones de la interfase para cada flujo. El número de experimentos que se utilizaron para determinar ambos promedios fue de entre 3 y 6 por cada flujo.

5. Resultados y Discusión

5.1 Formación de Microgotas

5.1.1 Relación de Flujos y Frecuencias

Primero se realizó un análisis de la relación entre el flujo total (agua + aceite mineral) que se utiliza para la generación y movimiento de las microgotas y la frecuencia de formación de las microgotas. Estos datos se muestran en la siguiente gráfica (Figura 40):

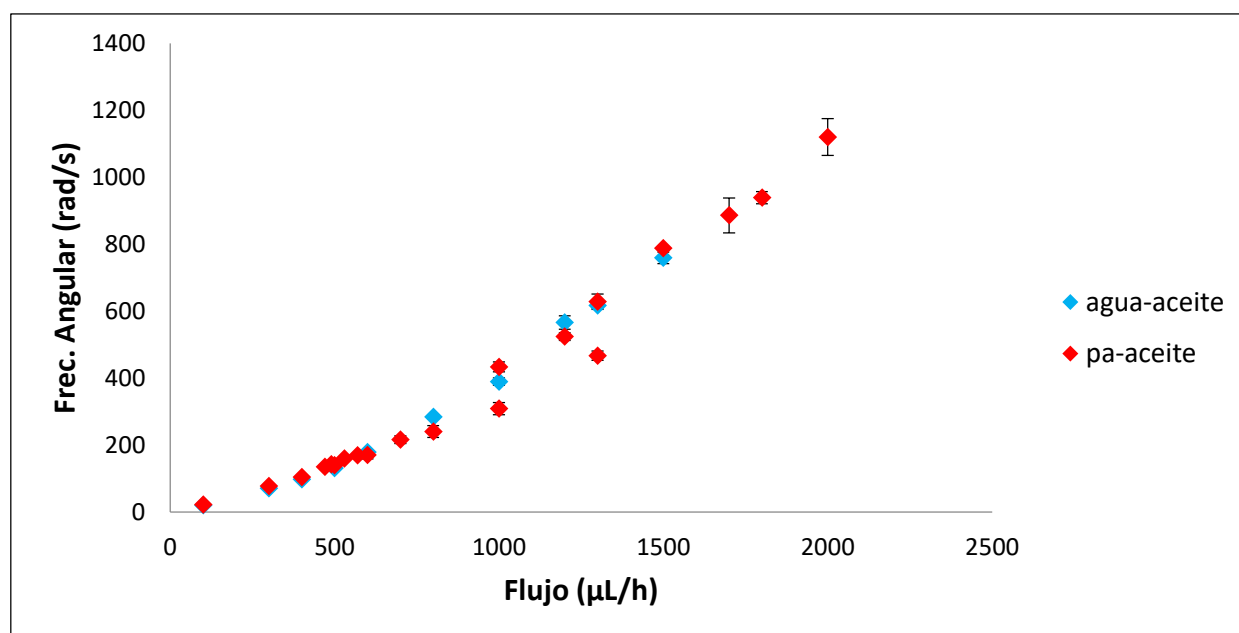


Figura 40. Frecuencia Angular de formación de las microgotas vs Flujo total en el canal de las microgotas (agua + aceite mineral). En todos los experimentos la relación entre el flujo del agua (Q_{agua}) y el flujo del aceite mineral (Q_{aceite}) siempre se mantuvo constante e igual a uno ($Q_{\text{agua}}/Q_{\text{aceite}} = 1$). La gráfica muestra los resultados obtenidos al utilizar agua o poliacrilamida (pa) en el canal de la interfase.

En la Figura 40 podemos observar que conforme aumentamos el flujo total en el canal de las microgotas, la frecuencia de producción de gotas aumenta y esto ocurre independientemente del fluido que se tenga en el canal de la interfase (agua-aceite o solución de poliacrilamida-aceite). Esta información es deseable ya que nos proporciona un modo sencillo de variar las frecuencias a través del flujo y satisfacer nuestro objetivo de estudiar la dinámica de la interfase en función de la frecuencia. Además, los datos muestran que el comportamiento de la frecuencia de formación de gotas con el flujo es independiente del fluido que se tenga en la interfase, lo que permite explorar una misma frecuencia en ambos experimentos imponiendo un mismo valor de flujo.

5.1.2 Relación del tamaño de las gotas con la frecuencia

Usando el programa ImageJ se realizaron mediciones del ancho y largo de las microgotas, así como de la distancia entre ellas para cada valor de frecuencia estudiado (Figura 41 A-C).

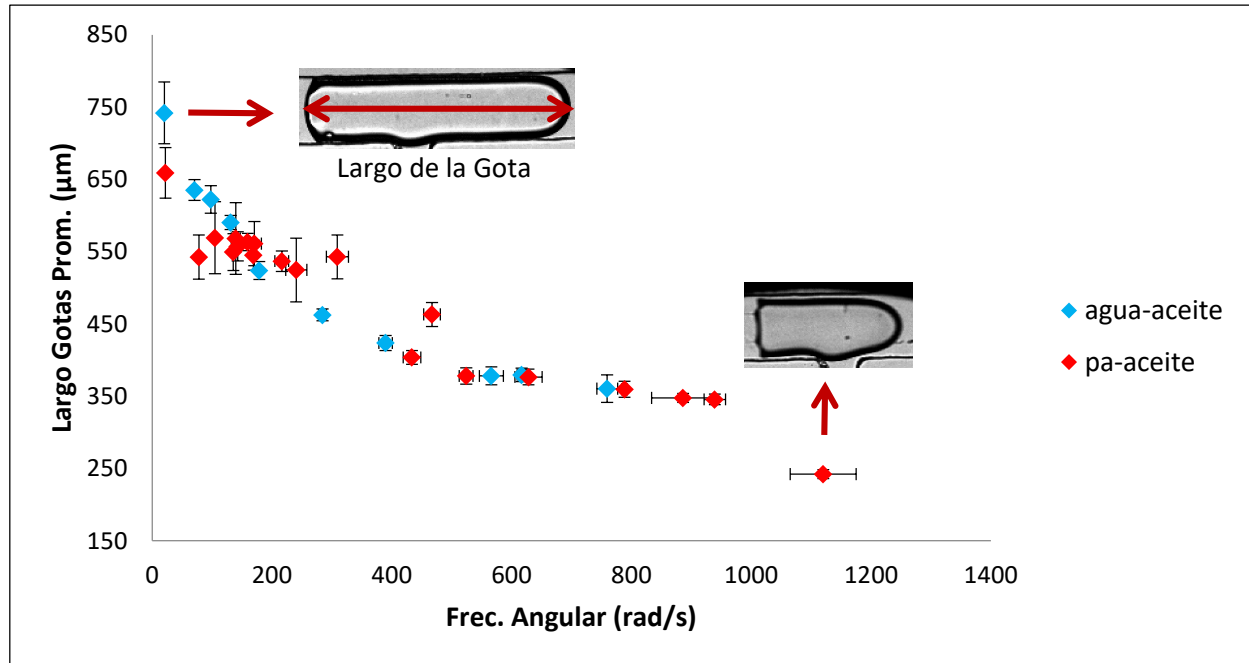


Figura 41-A. Largo de las gotas vs frecuencia angular para las dos diferentes interfases.

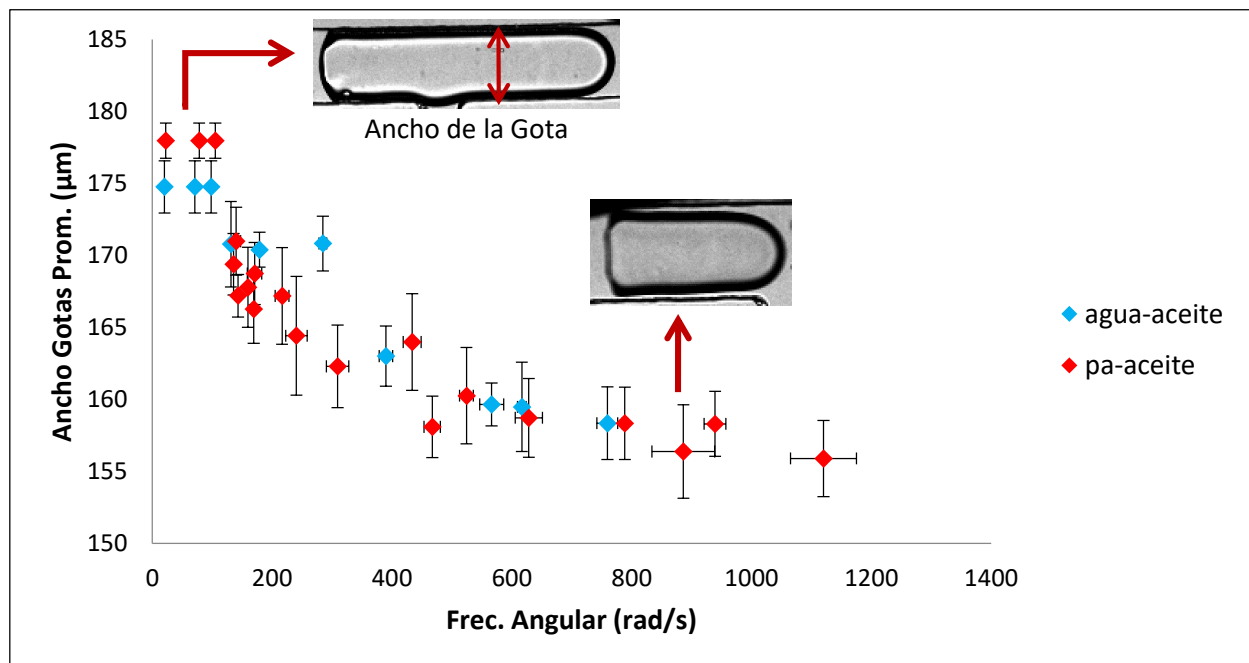


Figura 41-B. Ancho de las gotas vs frecuencia angular para las dos diferentes interfases.

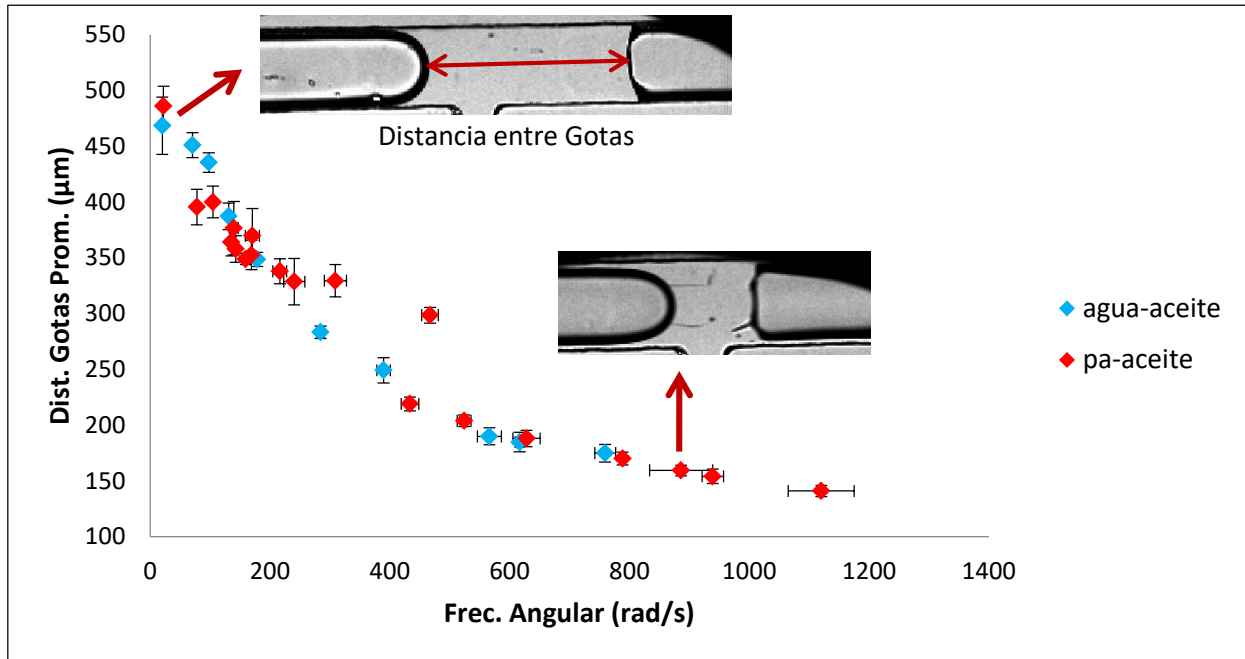


Figura 41-C. Distancia de las gotas vs frecuencia angular para las dos diferentes interfaces.

Las gráficas muestran que conforme aumenta la frecuencia, las tres longitudes analizadas se van haciendo más cortas, independientemente de si la interfase es agua-aceite o poliacrilamida-aceite. Esto es conveniente, ya que, si las gotas son muy parecidas en ambos experimentos, se puede suponer que tenemos el mismo gradiente de presión pulsado en ambos sistemas de estudio, lo cual permitirá una mejor comparación de la dinámica de ambas interfaces.

Un estudio sobre el cambio en el tamaño de las gotas al aumentar el flujo de agua y aceite manteniendo una relación de 1:1 no ha sido reportado en detalle en la literatura. Un trabajo cercano es el artículo [19], en donde se realizaron varios análisis sobre la dependencia que tiene la longitud de las microgotas al cambiar la relación de los flujos aceite y agua ($Q_{\text{agua}}/Q_{\text{aceite}}$ desde 0.01 hasta 10).

El análisis en [19] consistió en lo siguiente: en el interior de los microcanales se hacía ingresar el flujo de aceite (fluido continuo) y después se hacía ingresar el flujo de agua (fluido disperso). Mientras el flujo de aceite permanecía constante ($0.028 \mu\text{L s}^{-1}$) durante la realización del experimento, el flujo de agua se incrementó dentro de un rango de flujos que va desde 0 a $0.12 \mu\text{L s}^{-1}$ y de esta manera se determinó que la longitud de las microgotas de agua incrementa.

Lo descrito anteriormente se ve reflejado en la gráfica siguiente:

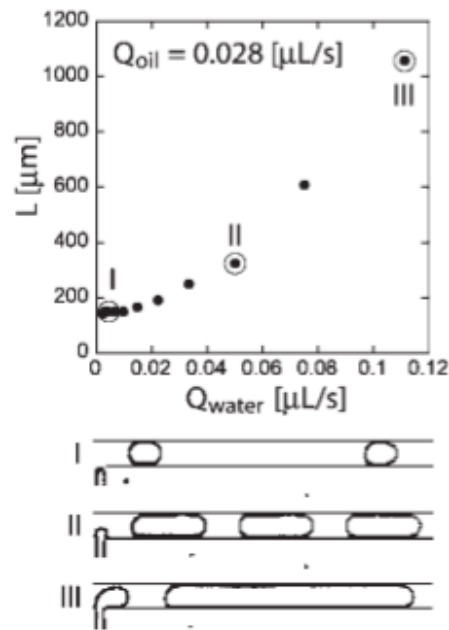


Figura 42. Longitud de las microgotas producidas en la unión en T ($h = 33 \text{ mm}$, $w = 100 \text{ mm}$, ganancia = 50 mm), vs las velocidades de flujo de la fase discontinua (Q_{agua}) y continua (Q_{aceite}). Valor constante de $Q_{\text{aceite}} = 0,028 \mu\text{L s}^{-1}$. $Q = \text{Flujo}$. Tomada de [19].

Algunos puntos de la gráfica se muestran en las imágenes con los números I, II, III. En la imagen I, se puede observar que cuando el flujo de agua es menor que el flujo de aceite ($0.028 \mu\text{L s}^{-1}$), las microgotas de agua tienen una longitud pequeña y en cambio, en la imagen con el número II, en donde el flujo de agua es el doble que el del aceite, las microgotas de agua tienen una longitud mayor y en la imagen III, si se aumenta más el flujo del agua, la longitud de las microgotas es aún mayor.

Por el contrario, en nuestros experimentos utilizamos una relación constante de 1:1 en el flujo de agua y aceite para la formación de las microgotas y el cambio en el tamaño ocurrió cuando aumentamos o disminuimos ambos flujos para cambiar la frecuencia.

El polímero está conformado por grupos metilos no polares, que debido a la alta flexibilidad que tiene la unión entre O-Si-O, pueden orientarse hacia la interfase con el aire dando lugar a una superficie hidrofóbica. El agua al ser un compuesto muy polar no tiene una interacción favorable con el PDMS y forma la superficie cóncava. A diferencia del agua, el aceite y el PDMS son dos compuestos apolares que se atraen por medio de los metilos que tiene el PDMS y las cadenas hidrocarbonadas que tiene el aceite, haciendo que el aceite moje en mayor proporción el canal de la interfase.

En la solución de poliacrilamida-aceite, tampoco se favorece la interacción con el PDMS, ya que además de ser una solución acuosa, la poliacrilamida en su estructura cuenta con grupos amidas, los cuales son grupos polares. Al igual que en el caso anterior, el aceite termina mojando en mayor proporción el canal de la interfase.

5.2.2 Descripción cualitativa de la interfase agua-aceite.

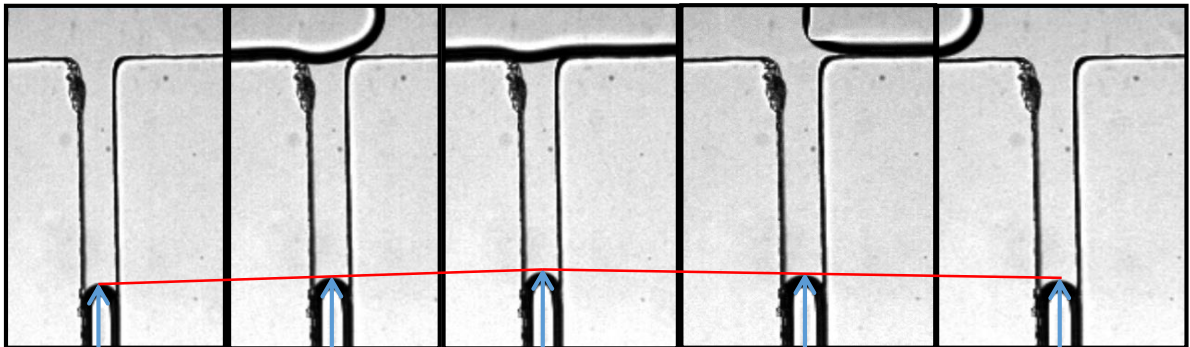
Con el análisis de las imágenes que conforman los videos observamos el efecto que tiene el aumento en la frecuencia de las microgotas sobre el movimiento de la interfase.

Para este análisis de imágenes se estudiaron 3 distintas frecuencias de gotas: una frecuencia pequeña, una intermedia y otra alta.

La primera frecuencia fue la de 20.3 rad/s (3.23 Hz, frecuencia pequeña), para lograr esta frecuencia de gotas se hicieron ingresar al microchip 100 $\mu\text{L/h}$ de agua y 100 $\mu\text{L/h}$ de aceite. Las gotas formadas con estos flujos son muy largas ($742 \pm 43 \mu\text{m}$), su ancho es igual al ancho del microcanal por donde pasan las gotas ($175 \pm 2 \mu\text{m}$) y la distancia entre una gota y otra es muy grande ($468 \pm 26 \mu\text{m}$).

Con esta frecuencia, la dinámica de la interfase mostró el comportamiento que se muestra en la Figura 45.

Ciclo 1



Ciclo 2

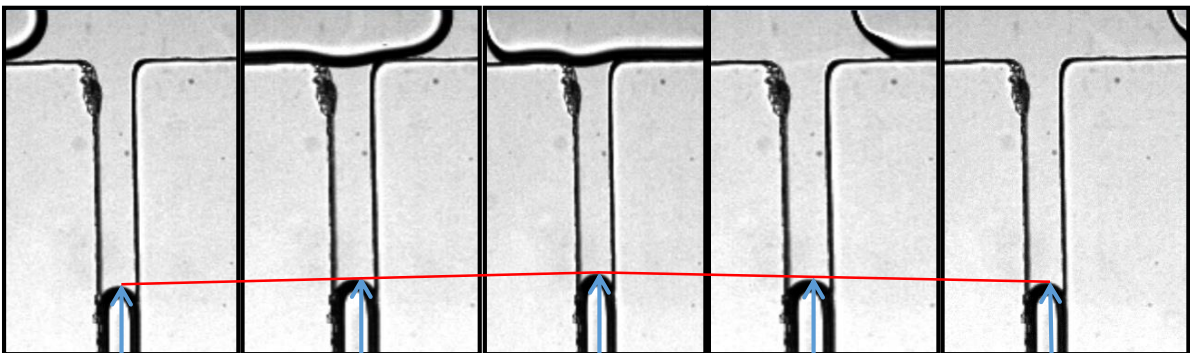


Figura 45. Oscilación de la interfase agua-aceite a una frecuencia de 20.3 rad/s.

En el primer ciclo se observa como al acercarse la gota a la entrada del microcanal de la interfase provoca un gradiente de presión negativo que desplaza a la interfase hacia arriba. Conforme la gota pasa por la entrada del microcanal, la interfase continúa subiendo. Cuando el 66% de la microgota ha cruzado el canal de la interfase, la interfase logra su máxima amplitud de movimiento.

Al irse alejando la gota de la entrada del microcanal de la interfase, el gradiente de presión se vuelve positivo, empujando a la interfase hacia el interior del canal, hasta que la interfase llega a su mínimo nivel original. Este mínimo nivel lo alcanza en medio de dos gotas.

En el siguiente ciclo, la interfase obtuvo su máxima amplitud de oscilación cuando el 73% de la microgota había cruzado el microcanal de la interfase.

Sabiendo que, en los dos primeros ciclos, la interfase alcanza la máxima amplitud de oscilación cuando ha pasado más de la mitad de la microgota, se quiso conocer la longitud desde el frente de la microgota hasta la parte de la microgota en donde la interfase llega a su máxima amplitud, para esto se realizaron mediciones en las microgotas como se muestran en la siguiente imagen (Figura 46):

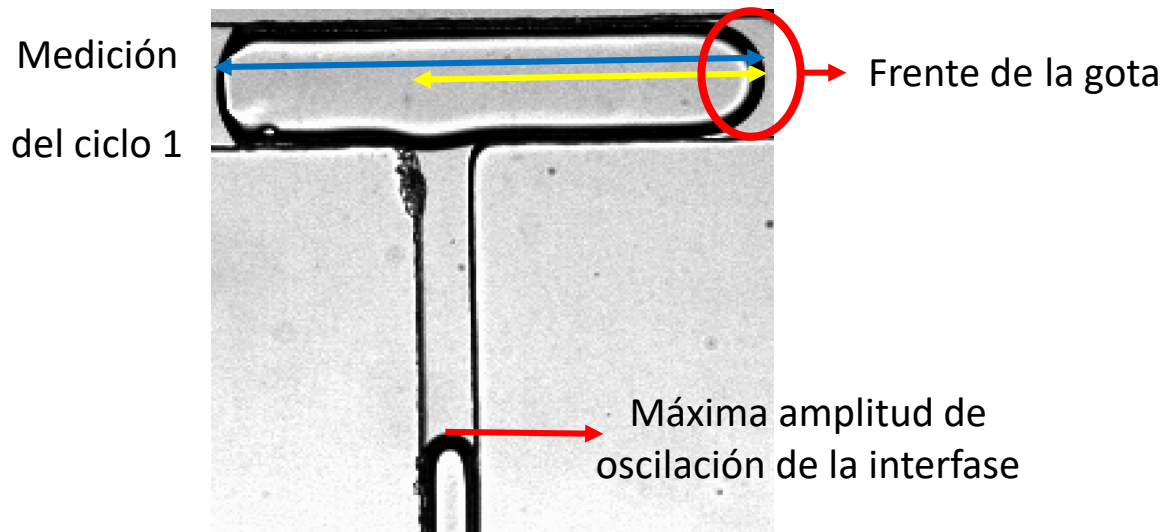


Figura 46. Determinación del porcentaje de la gota que ha avanzado cuando la interfase alcanza su máxima amplitud. Las mediciones se hicieron desde la cabeza de la microgota hasta la parte de la microgota en donde la interfase alcanza su máxima amplitud. La Flecha amarilla indica la medición de la gota cuando la interfase llega a su máxima amplitud es igual a 496 micras, la flecha azul indica la longitud total de la microgota es igual a 750 micras. Con esas mediciones sacamos el porcentaje, dando como resultado que el 66% de la microgota ha pasado el microcanal de la interfase cuando la interfase llega a su máxima amplitud.

Para el primer ciclo, la longitud desde el frente de la microgota hasta la parte de la microgota en donde la interfase ha alcanzado su máxima amplitud es igual a 496 μm (la longitud total de esta microgota es 750 μm).

Para el segundo ciclo, la longitud registrada fue de 540 μm (la longitud total de esta microgota es 740 μm).

Para saber que ocurre en ciclos posteriores se realizaron las mediciones para un tercer y cuarto ciclo, obteniendo lo siguiente:

Para el tercer ciclo, la longitud a la máxima amplitud es de 468 μm (la longitud total de esta microgota es 775 μm) lo que equivale a un 60% de la microgota.

Para el cuarto ciclo, la longitud a la máxima amplitud es de 512 μm (la longitud total de esta microgota es 757 μm) equivalente a un 67% de la microgota.

En la siguiente tabla se muestran las mediciones obtenidas del análisis anterior:

Tabla 3. Relación entre la longitud y el porcentaje de la gota que ha pasado cuando la amplitud de la oscilación es máxima para la frecuencia baja 20.3 rad/s (3.23 Hz).

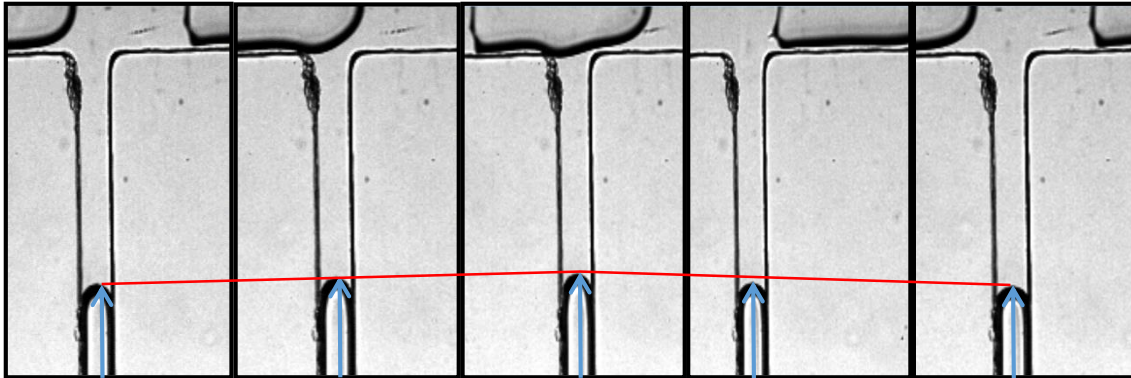
| Ciclo | Longitud de la gota que ha pasado cuando la amplitud está en su máximo | Longitud total de la microgota | % de la gota que ha pasado cuando la amplitud está en su máximo |
|-------|--|--------------------------------|---|
| 1 | 496 μm | 750 μm | 66% |
| 2 | 540 μm | 740 μm | 73% |
| 3 | 468 μm | 775 μm | 60% |
| 4 | 512 μm | 757 μm | 67% |

Con las mediciones realizadas pudimos determinar que, en estos 4 ciclos, la interfase llega a su máxima amplitud cuando la gota ha recorrido entre un 60 y 73% de su longitud. Este comportamiento se mantiene en ciclos posteriores.

Para la frecuencia intermedia de 389.7 rad/s (62 Hz), se necesitó ingresar al microchip 1000 $\mu\text{L/h}$ de agua y 1000 $\mu\text{L/h}$ de aceite. Con estos flujos, el largo de las gotas se hace más pequeño ($424 \pm 10 \mu\text{m}$), el ancho de las gotas también se reduce ($163 \pm 2 \mu\text{m}$) por lo que se logra ver que la gota ya no ocupa todo el ancho del canal y también la distancia entre gota y gota se reduce ($249 \pm 11 \mu\text{m}$).

La dinámica que mostró la interfase frente a esta frecuencia se observa en la Figura 47:

Ciclo 1



Ciclo 2

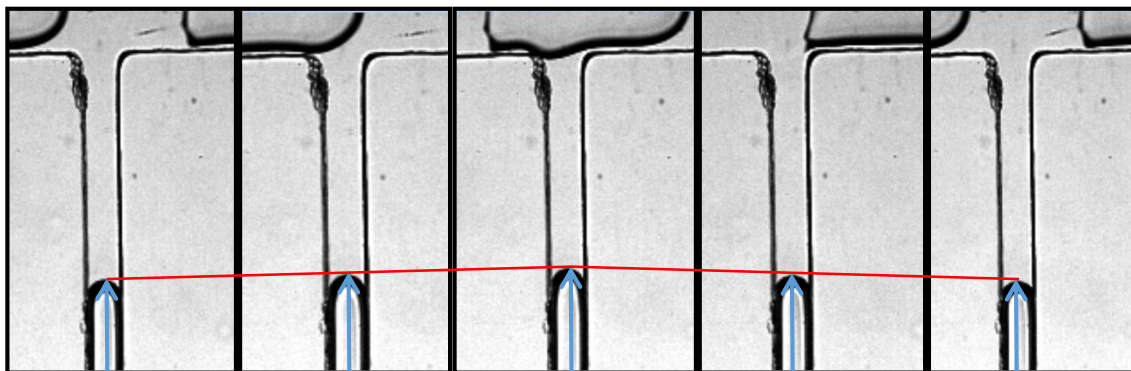


Figura 47. Oscilación de la interfase agua-aceite a una frecuencia de 389.7 rad/s.

De acuerdo con las imágenes, el primer ciclo muestra un comportamiento muy parecido al primer ciclo de la frecuencia de 20.3 rad/s. La diferencia es que las gotas a esta frecuencia son más pequeñas y provocan que el gradiente de presión sea menor y esto influye en que la amplitud de la oscilación sea más pequeña que en la frecuencia anterior.

Otra cosa que se observó en estas imágenes es que, para el primer ciclo, la máxima amplitud de oscilación se alcanzó cuando el 52% de la microgota había cruzado el microcanal de la interfase.

Al irse alejando la gota del microcanal de la interfase, el gradiente de presión aumenta, empujando a la interfase hacia el interior del canal, hasta que la interfase llega a su mínimo nivel. Al igual que con la frecuencia pasada, el mínimo nivel lo alcanza en medio de las dos gotas.

En el segundo ciclo, la máxima amplitud la alcanza cuando el 72% de la microgota había cruzado el microcanal de la interfase.

Para conocer la porción de la longitud que tiene la microgota cuando la interfase llega a su máxima amplitud se realizó el mismo análisis que la frecuencia anterior y a continuación se muestran las mediciones:

Tabla 4. Relación entre la longitud y el porcentaje de la gota que ha pasado cuando la amplitud de la oscilación es máxima para la frecuencia intermedia 389.7 rad/s (62 Hz).

| Ciclo | Longitud de la gota que ha pasado cuando la amplitud está en su máximo | Longitud total de la microgota | % de la gota que ha pasado cuando la amplitud está en su máximo |
|-------|--|--------------------------------|---|
| 1 | 215 μm | 415 μm | 52% |
| 2 | 298 μm | 415 μm | 72% |
| 3 | 271 μm | 417 μm | 65% |
| 4 | 244 μm | 419 μm | 58% |

Con las mediciones realizadas se determinó que la interfase llega a su máxima amplitud cuando entre un 52-72% de la microgota ha cruzado el canal de la interfase y además esto se conserva en los ciclos siguientes.

Por último, la frecuencia alta que analizamos fue de 759.5 rad/s (120.9 Hz), para obtener esta frecuencia de microgotas se necesitaron flujos de 1500 $\mu\text{L/h}$ tanto para el agua como para el aceite. Las microgotas formadas son más pequeñas en largo ($361 \pm 19 \mu\text{m}$), y en ancho ($158 \pm 3 \mu\text{m}$), además la distancia entre microgota y microgota se hace más corta ($175 \pm 8 \mu\text{m}$).

A continuación, se observan las imágenes que muestra la dinámica que tuvo la interfase frente a esta frecuencia (Figura 48):



Figura 48. Oscilación de la interfase agua-aceite a una frecuencia de 759.5 rad/s

La dinámica que muestra la interfase es un poco distinta a la que se ve en las frecuencias pasadas. Una diferencia en estos experimentos viene dada por el largo y el ancho de las microgotas y la distancia entre ellas. Estas tres características influyen en la creación de un gradiente de presión todavía menor que provoca que la amplitud de oscilación de la interfase sea más pequeña que en las frecuencias anteriores.

Para esta frecuencia alta, se hizo lo mismo para obtener las mediciones: empezando a medir desde el frente de la gota hasta la parte de la microgota cuando la interfase llega a su máxima amplitud. En la siguiente figura se observa esto:

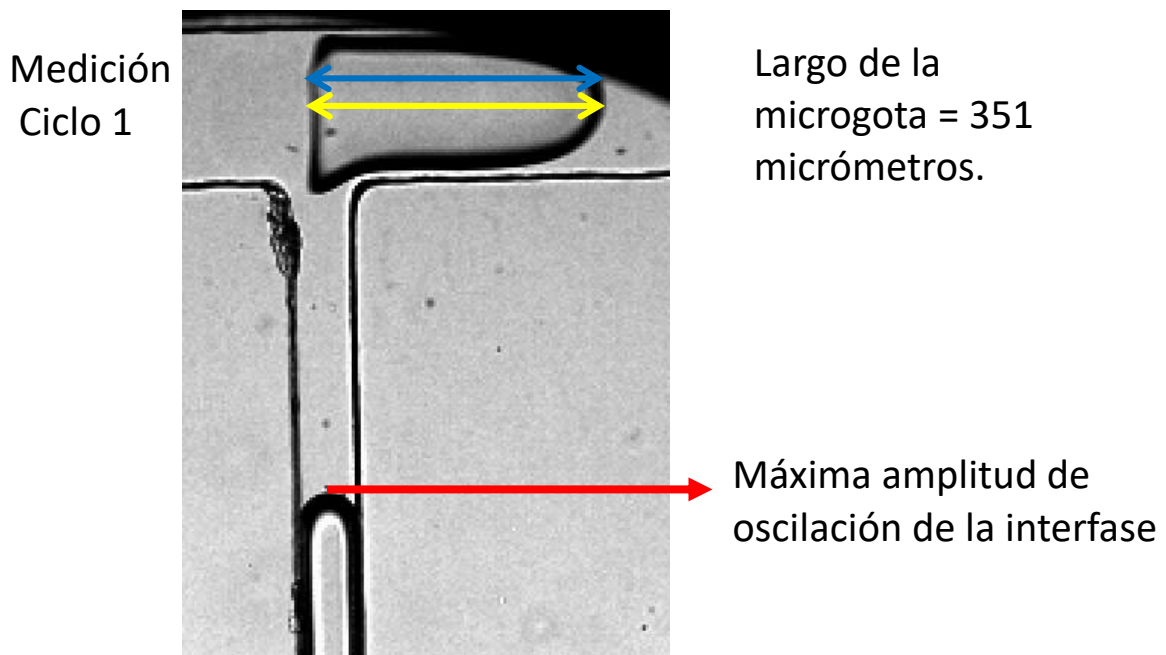


Figura 49. Determinación del porcentaje de la gota que ha avanzado cuando la interfase alcanza su máxima amplitud para la frecuencia de 759.5 rad/s. La Flecha amarilla indica la medición de la gota cuando la interfase llega a su máxima amplitud y la flecha azul indica la longitud total de la microgota. En ambos casos la longitud es igual a 351 μm , dando como resultado que el 100% de la microgota ha cruzado por la entrada del microcanal de la interfase cuando la interfase llega a su máxima amplitud.

Este mismo análisis se hizo para los siguientes tres ciclos obteniendo el mismo porcentaje que el ciclo 1. Por lo tanto, para la frecuencia alta, el 100% de la microgota ha cruzado por la entrada del microcanal de la interfase cuando la interfase llega a su máxima amplitud.

Cuando la microgota se aleja de la entrada del canal, la interfase comienza a ser empujada al interior de su canal hasta que llega a su mínimo nivel. A diferencia de las frecuencias bajas y medias, esto ocurre, no en el espacio entre dos gotas, si no cuando aproximadamente una tercera parte de la siguiente microgota está cruzando el microcanal de la interfase (Figura 48). Esto se mantuvo en los 4 ciclos que estudiamos.

Se realizaron mediciones para conocer con precisión la longitud que tienen las microgotas cuando la interfase llega a su mínimo nivel, a continuación, se muestran estas mediciones:

Tabla 5. Relación entre la longitud y el porcentaje de la gota que ha pasado cuando la amplitud de la oscilación es mínima para la frecuencia alta 759.5 rad/s (120.9 Hz).

| Ciclo | Longitud de la gota que ha pasado cuando la amplitud está en su mínimo | Longitud total de la microgota | % de la gota que ha pasado cuando la amplitud está en su mínimo |
|-------|--|--------------------------------|---|
| 1 | 101 μm | 352 μm | 29% |
| 2 | 86 μm | 353 μm | 24% |
| 3 | 202 μm | 349 μm | 58% |
| 4 | 187 μm | 348 μm | 53% |

Con las mediciones realizadas se determinó que la interfase llega a su mínimo nivel cuando entre un 24-58% de la microgota entrante ha cruzado el canal de la interfase y además esto se conserva en los ciclos siguientes.

Finalmente, es notorio que hay un cambio en la geometría de las gotas, mientras que a frecuencias bajas el frente y la parte trasera de la gota muestra una curvatura parecida, a frecuencias altas la parte trasera se vuelve plana.

5.2.3 Descripción cualitativa de la interfase poliacrilamida-aceite.

Al igual que en los experimentos de la interfase agua-aceite, se hizo el mismo análisis sobre las imágenes que conforman los videos del movimiento de la interfase poliacrilamida-aceite mineral, también se estudiaron 3 distintas frecuencias de gotas:

- Frecuencia pequeña es igual a 22.3 rad/s (3.55 Hz).
- Frecuencia intermedia es igual a 309.2 rad/s (49.21 Hz).
- Frecuencia alta es igual 467.2 rad/s (74.36 Hz).

Las siguientes figuras ilustran la dinámica que tuvo la interfase poliacrilamida-aceite mineral frente a estas 3 frecuencias:

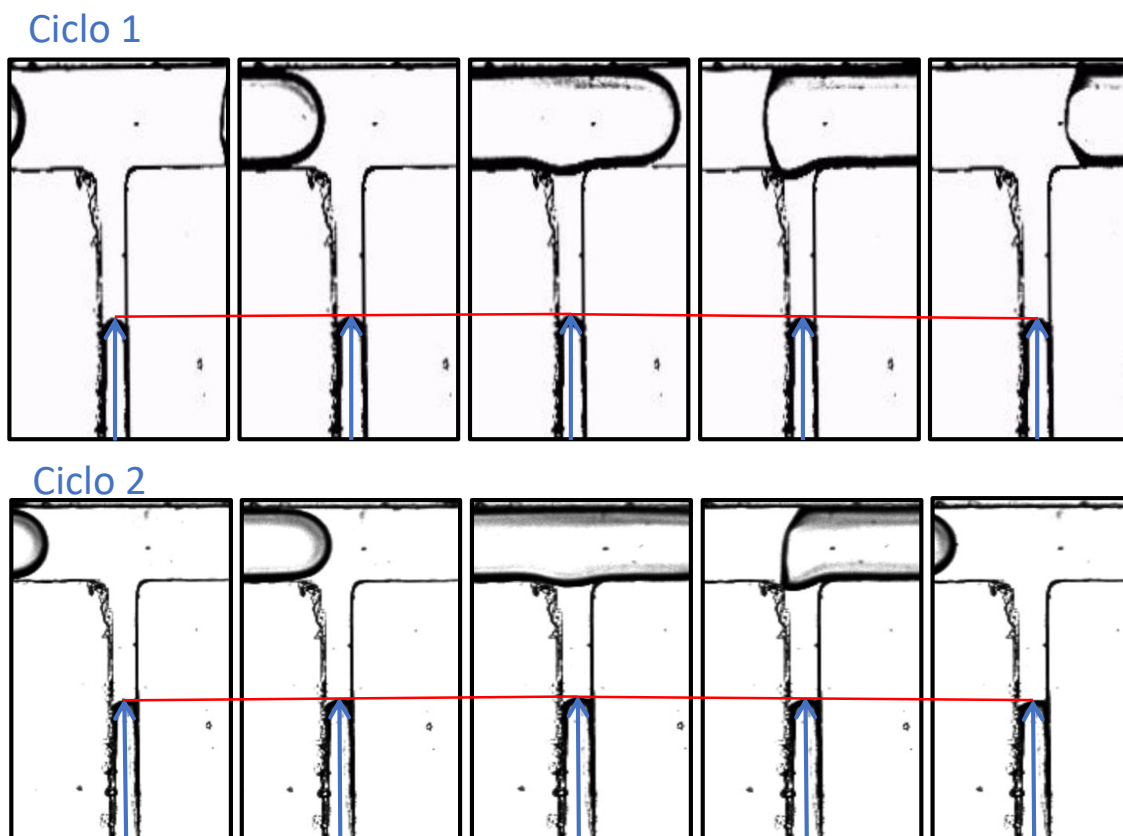
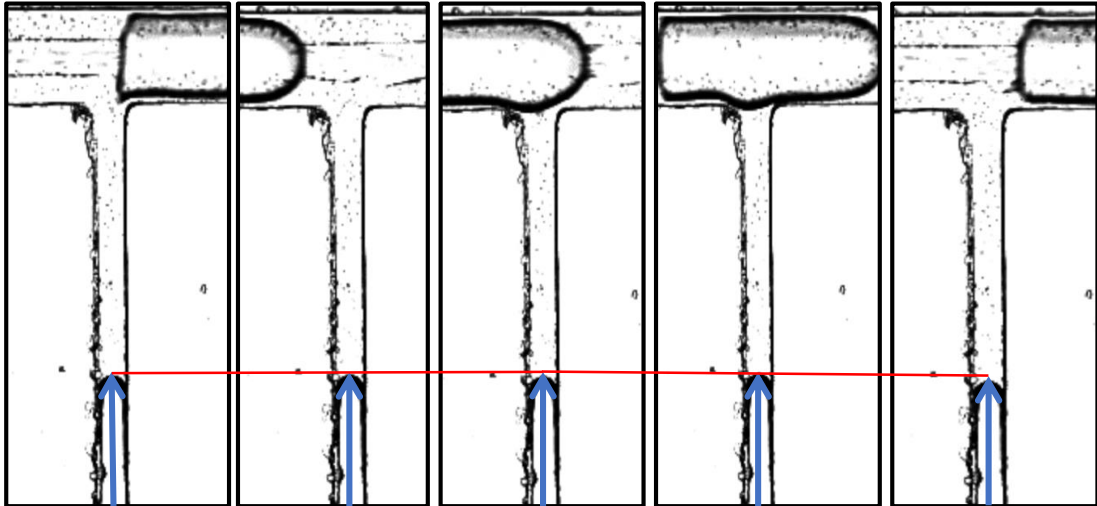


Figura 50. Oscilación de la interfase poliacrilamida-aceite a una frecuencia de 22.3 rad/s.

Ciclo 1



Ciclo 2

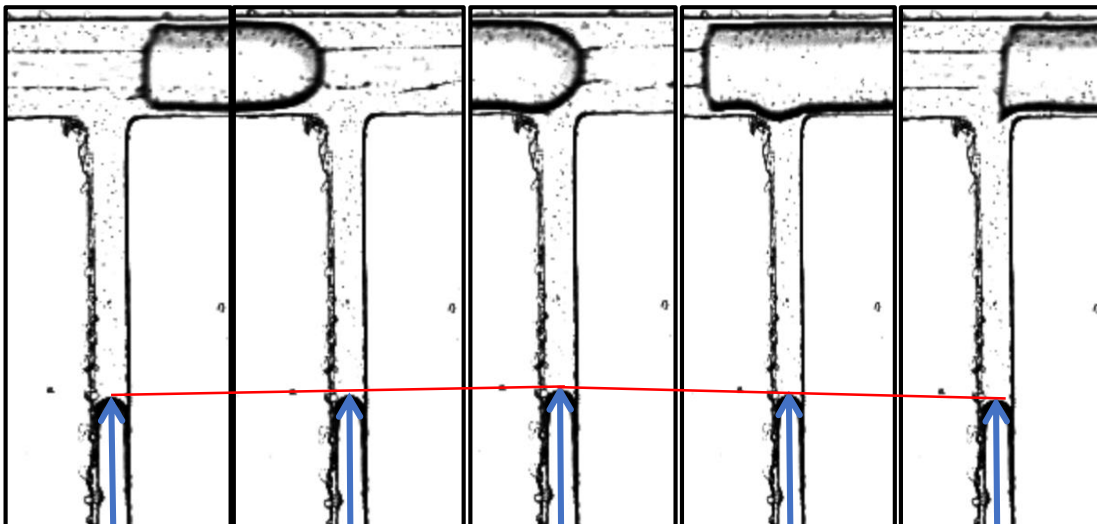
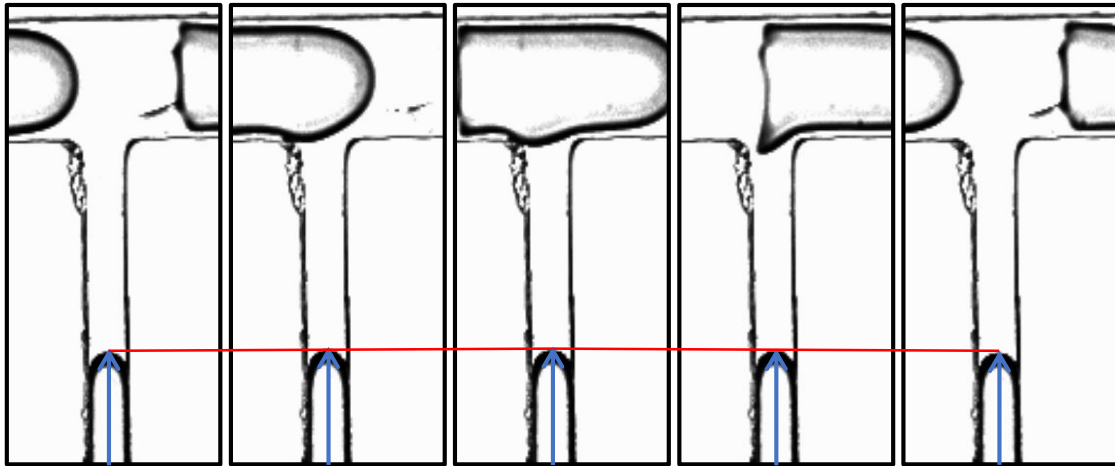


Figura 51. Oscilación de la interfase poliacrilamida-aceite a una frecuencia de 309.2 rad/s

Ciclo 1



Ciclo 2

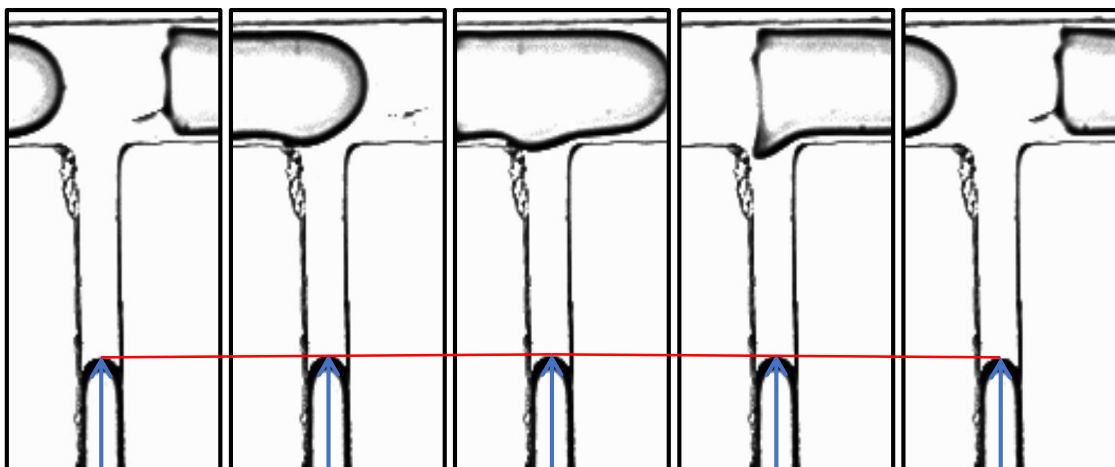


Figura 52. Oscilación de la interfase poliacrilamida-aceite a una frecuencia de 467.2 rad/s

En la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 6. Sistema: Poliacrilamida con una concentración de 1.04 mg/mL-Aceite Mineral con 1.8 % m/m de Span 80.

| | Frecuencia baja 22.3 rad/s | Frecuencia media 309.2 rad/s | Frecuencia alta 467.2 rad/s |
|---|---|---|---|
| Flujo agua/flujo aceite | 100µL/h / 100 µL/h | 1000µL/h / 1000 µL/h | 1300µL/h / 1300 µL/h |
| Longitud de la gota | 660 ± 35 µm | 542 ± 30 µm | 463 ± 17 µm |
| Ancho de la gota | 178 ± 1 µm | 162 ± 3 µm | 158 ± 2 µm |
| Distancia entre las gotas | 486 ± 18 µm | 329 ± 14 µm | 298 ± 7 µm |
| Porcentaje de la gota que ha pasado para obtener la máxima amplitud | 67% (primer ciclo) 70% (segundo ciclo) 63% (tercer ciclo) 59% (cuarto ciclo) | 24% (primer ciclo) 17% (segundo ciclo) 21% (tercer ciclo) 25% (cuarto ciclo) | 74% (primer ciclo) 71% (segundo ciclo) 68% (tercer ciclo) 64% (cuarto ciclo) |

Por lo tanto, se determinó:

A frecuencia baja, la interfase llega a su máxima amplitud cuando entre 59-70% de la microgota ha cruzado el canal de la interfase y además esto se conserva en los ciclos siguientes.

A frecuencia intermedia, la interfase llega a su máxima amplitud cuando entre 17-25% de la microgota ha cruzado el canal de la interfase y además esto se conserva en los ciclos siguientes.

A frecuencia alta, la interfase llega a su máxima amplitud cuando entre 64-74% de la microgota ha cruzado el canal de la interfase y además esto se conserva en los ciclos siguientes.

Finalmente, comparando las imágenes para ambos experimentos (agua-aceite mineral y poliacrilamida-aceite mineral), a frecuencias bajas, la posición que tiene la microgota cuando la interfase logra la máxima amplitud es similar en ambas interfases.

En cambio, al comparar las frecuencias intermedias y las frecuencias altas, en los dos casos, la posición que tienen las microgotas con respecto a la máxima amplitud de oscilación es diferente en las dos interfases.

Aunque existan estas diferencias, podemos afirmar que, a frecuencia bajas, intermedias o altas, por cada microgota que cruza el microcanal de la interfase se produce un ciclo o una oscilación en la posición de la interfase. Esto se cumple para las dos interfases estudiadas.

5.3 Descripción Cuantitativa

Con los datos de amplitud promedio de oscilación y de frecuencia promedio de gotas pudimos realizar la siguiente gráfica:

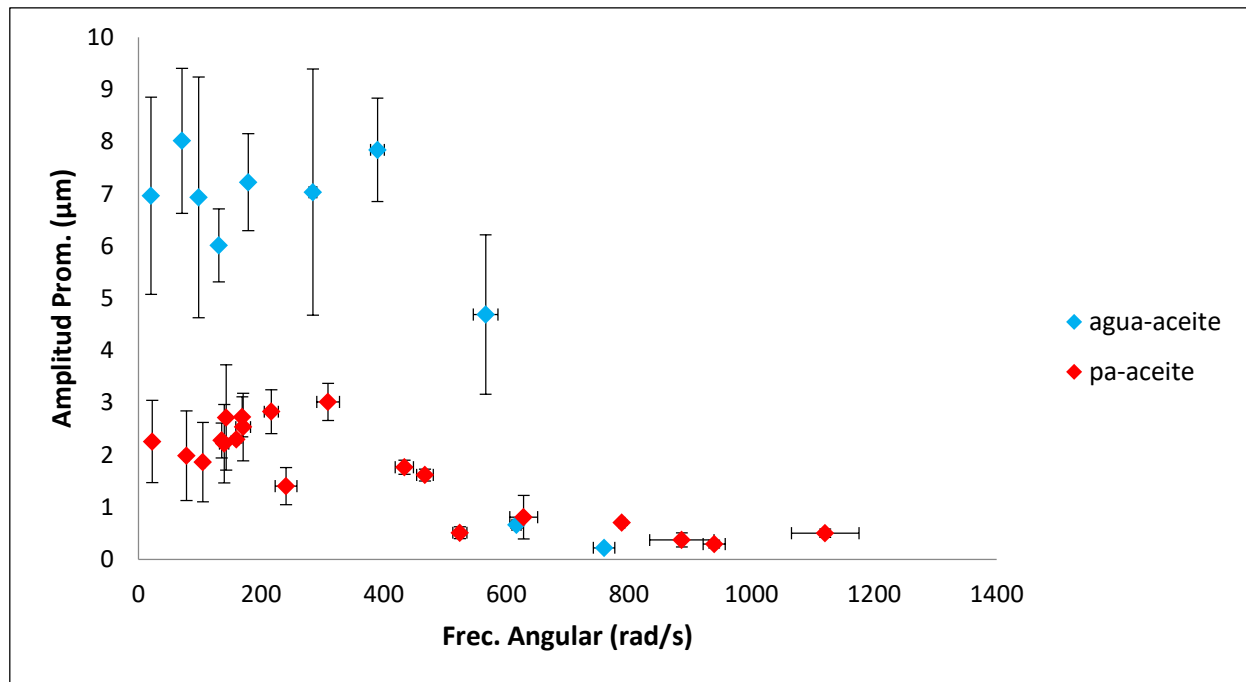


Figura 53. Gráfica de Amplitud Promedio vs Frecuencia Angular para ambas interfases.

En la gráfica podemos observar que la amplitud de oscilación de la interfase agua aceite, se mantiene constante dentro del intervalo de 20.3-389.7 rad/s, pero después, la amplitud disminuye con el aumento de la frecuencia. De la misma manera, para la interfase poliacrilamida-aceite, la amplitud de oscilación se mantiene constante en el intervalo de 22.3-309.2 rad/s, pasando este intervalo, la amplitud disminuye con el aumento de la frecuencia.

La disminución en la amplitud de oscilación corresponde a las frecuencias (389.7 rad/s en adelante para los experimentos con la interfase agua-aceite y 309.2 rad/s en adelante para los experimentos con la interfase poliacrilamida-aceite) donde las gotas se van separando de los canales, lo que hace suponer que la amplitud del gradiente de presión se va haciendo cada vez más pequeña provocando una oscilación de amplitud más pequeña en la interfase.

Además, el tamaño que tiene la amplitud depende de la viscosidad del sistema fluido-fluido. Las viscosidades de los componentes de la interfase agua-aceite a 23 °C (temperatura a la que realizamos los experimentos) son: agua (0.000933 kg/m·s) y

aceite (0.056 kg/m·s). Para los componentes de la interfase poliacrilamida-aceite, las viscosidades son: poliacrilamida (0.025 kg/m·s) y aceite (0.056 kg/m·s). La interfase agua-aceite es por tanto de menor viscosidad que la interfase poliacrildamida-aceite. A menor viscosidad, se observa claramente una mayor amplitud de oscilación.

Posteriormente, se hizo un análisis de la velocidad de oscilación con respecto a la frecuencia, para ello se realizó la siguiente gráfica:

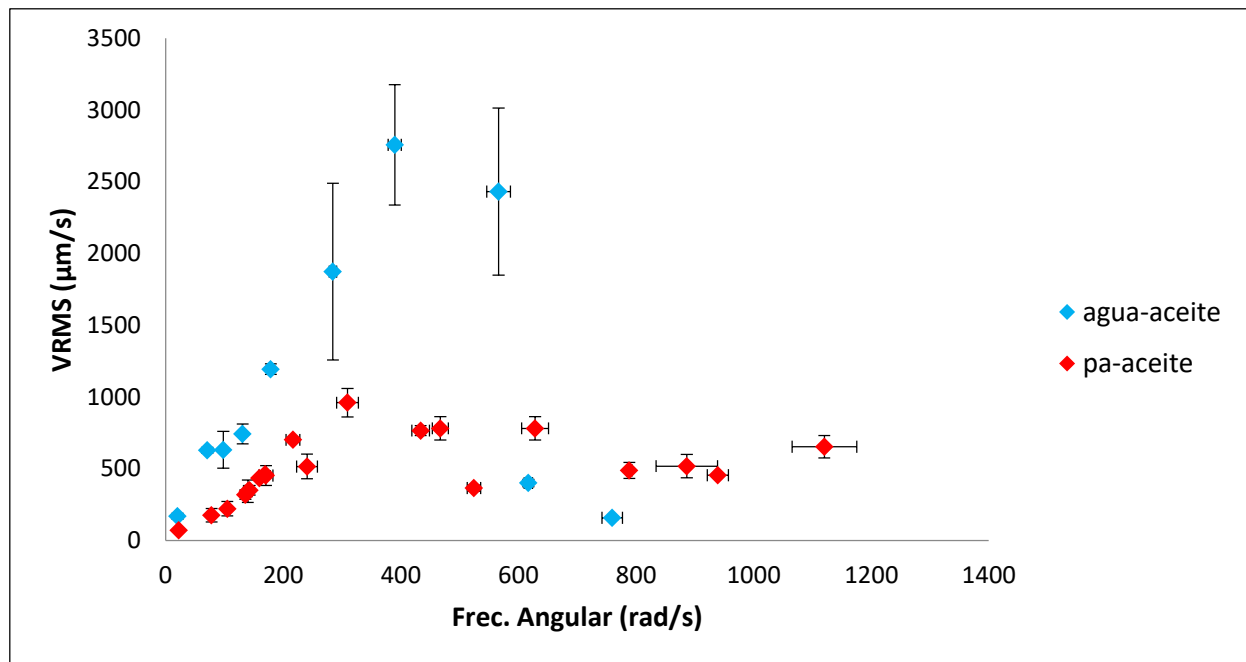


Figura 54. Gráfica de VRMS vs Frecuencia Angular para ambas interfases.

Para la obtención de la gráfica de la Figura 54 se hizo lo siguiente:

Los datos de velocidad obtenidos de los experimentos en ambas interfases son positivos y negativos con un promedio cercano a cero y se deseaba tener un valor de velocidad representativo de cada experimento. Para ello se requirió del uso de la media cuadrática, la cual es una medida estadística con la que pudimos representar la magnitud de la variable que estamos estudiando. La media cuadrática [21] para los datos de velocidad de nuestros experimentos la calculamos de la siguiente manera:

$$VRMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^2}$$

VRMS = La media cuadrática de la velocidad ; Vi = Los datos de velocidad.

En la gráfica de VRMS vs frecuencia angular se observa un mismo comportamiento para ambas interfases: para la interfase agua-aceite, la velocidad aumenta de manera lineal dentro de un intervalo de frecuencias de 20.3-389.7 rad/s, pero pasando ese intervalo la velocidad disminuye.

De manera similar, para la interfase poliacrilamida-aceite la velocidad aumenta de manera lineal dentro de un intervalo de 22.3-309.2 rad/s, y después de ese intervalo de frecuencia la velocidad disminuye.

Los valores de viscosidad que se mencionaron anteriormente para cada uno de los componentes de ambas interfases influyen en la velocidad de éstas, permitiendo que la interfase agua-aceite se desplace a una mayor velocidad frente al gradiente presión pulsado en comparación con la interfase aceite-poliacrilamida.

Además, la densidad de los fluidos también influye en la velocidad de ambas interfases. Para los componentes de la interfase agua-aceite, las densidades de los fluidos a 23 °C son: agua (997.62 kg/m³) y aceite (800 kg/m³) y para los componentes de la interfase poliacrilamida-aceite, sus densidades son: poliacrilamida (998.66 kg/m³) y aceite (800 kg/m³).

Debido a estos valores de densidad, cuando una microgota cruza el canal donde está la interfase agua-aceite, hace que el agua desplace fácilmente al aceite hacia el microcanal de transporte de microgotas, después de que la interfase llega a su máxima amplitud de oscilación, la microgota se va alejando de la entrada del canal de la interfase haciendo que el aceite desplace al agua y la interfase se aleje del canal de las microgotas. Al ser más densa el agua que el aceite, al aceite se le dificulta desplazar al agua.

En cambio, cuando la microgota se va alejando del canal donde está situada la interfase poliacrilamida-aceite, al aceite le es más difícil poder desplazar a la poliacrilamida ya que a diferencia del agua, la poliacrilamida es más densa. Considerando lo ocurrido en ambas interfases, esto provoca que la velocidad de oscilación de la interfase poliacrilamida aceite sea menor en comparación a la interfase agua-aceite.

Por último, la disminución en la velocidad de oscilación ocurre en las siguientes frecuencias: 389.7 rad/s en adelante para los experimentos con la interfase agua-aceite y 309.2 rad/s en adelante para los experimentos con la interfase poliacrilamida-aceite, también se ve influenciada por la separación de la microgotas en los microcanales, lo

que hace suponer que la amplitud del gradiente de presión se va haciendo cada vez más pequeña provocando una oscilación de amplitud más pequeña en la interfase.

En [22] se reportó un trabajo de gradientes de presión pulsado para estudiar el movimiento de un fluido Newtoniano y uno viscoelástico (sin interfases en el sistema). En este estudio, introdujeron un fluido newtoniano (solución de glicerol) y unas partículas (esferas de poliamida de 20 μm) dentro de una columna (diámetro interno = 5 cm.) y con ayuda de un pistón que estaba colocado debajo de la columna hicieron pulsar al fluido en un rango de frecuencias que va de 0 a 16 Hz.

Posteriormente cambiaron el fluido newtoniano por un fluido viscoelástico (solución de cloruro de cetilpiridonio y salicilato de sodio) e igualmente le agregaron partículas y por último lo hicieron oscilar dentro del mismo rango de frecuencias. Por medio de un láser siguieron la dinámica de las partículas en el centro de la columna y con los datos que se obtuvieron, calcularon la VRMS dentro de este rango de frecuencias para ambos fluidos.

Con los datos de VRMS y frecuencia, hicieron la siguiente gráfica:

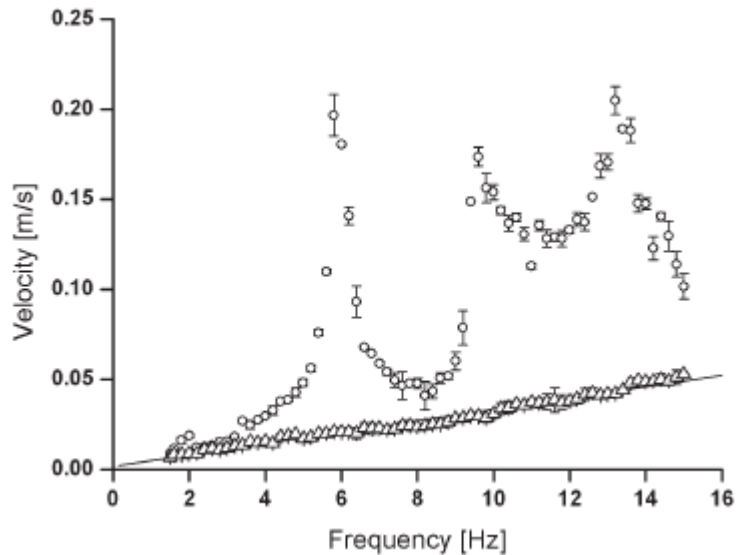


Figura 55. VRMS local en el centro de la columna. Los círculos corresponden al fluido viscoelástico y los triángulos al fluido newtoniano. Tomada de [22].

En [22] se obtuvo un comportamiento lineal para el fluido newtoniano y para el fluido viscoelástico se lograron encontrar 3 picos en 3 diferentes frecuencias. Estas frecuencias son conocidas como frecuencias de resonancia.

Si comparamos nuestros resultados con los de este trabajo, primeramente, nosotros pudimos generar un gradiente de presión pulsado por medio de unas microgotas en lugar de usar un pistón.

Segundo, en los experimentos que realizamos, en lugar de estudiar la dinámica de bulto de un fluido, nosotros estudiamos la dinámica de una interfase. Una de las interfaces de estudio estaba formada con dos fluidos Newtonianos (agua y aceite) y la otra con un fluido viscoelástico y uno Newtoniano (poliacrilamida-aceite). En la velocidad de oscilación de la interfase agua-aceite se alcanzaron mayores velocidades con respecto a la interfase poliacrilamida-aceite, esto es muy diferente a lo que observamos en la Figura 55, en donde las velocidades que se obtienen para el fluido viscoelástico son mayores a las del fluido newtoniano. Esto se debe a que, probablemente con las condiciones de estudio de nuestros experimentos podemos ver el efecto de las diferentes viscosidades y densidades de los fluidos sobre la dinámica de la interfase, pero no el efecto de la elasticidad de un fluido viscoelástico sobre su dinámica (en la cual se pueden presentar resonancias).

5.4 Análisis del Movimiento Oscilatorio

5.4.1 Gráficas de Velocidad Característica vs Frecuencia Angular

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en la Gráfica de VRMS vs Frecuencia Angular para ambas interfases, se realizó un análisis para determinar qué variables son las que determinan el comportamiento de la velocidad.

Para este análisis se usaron 4 longitudes del sistema: la amplitud de oscilación, el ancho de las microgotas, el largo de las microgotas y la distancia entre las microgotas, así como la frecuencia angular de pulsado. Posteriormente, multiplicamos cada longitud por la frecuencia de pulsado, obteniendo 4 diferentes velocidades a las que llamamos velocidades características.

Los datos pertenecientes a las 4 velocidades características se graficaron con respecto a la frecuencia angular. A continuación, se muestran estas gráficas:

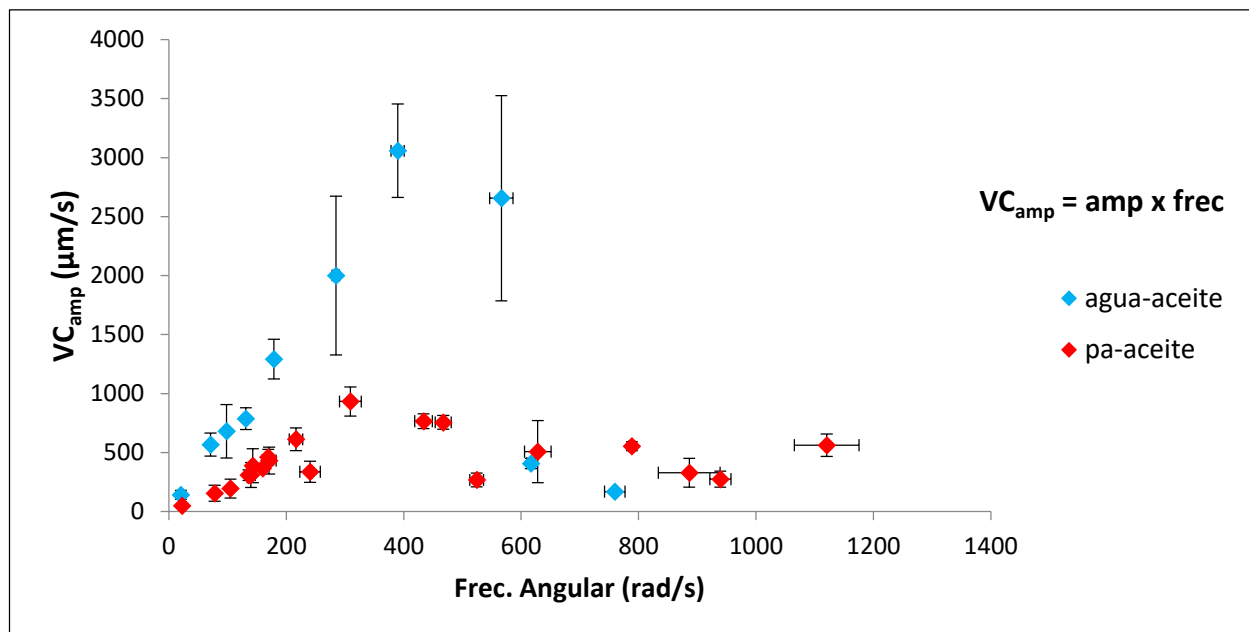


Figura 56-A. Gráfica de VC_{amp} vs Frecuencias para ambas interfases. La velocidad característica de cada flujo se determinó con la amplitud promedio de oscilación multiplicada por su respectiva frecuencia angular. Se observa un comportamiento muy similar al de la Gráfica 53. Significado del símbolo VC_{amp} : VC = Velocidad Característica y el subíndice $_{amp}$ corresponde a la longitud que fue utilizada para obtenerla (la amplitud de oscilación).

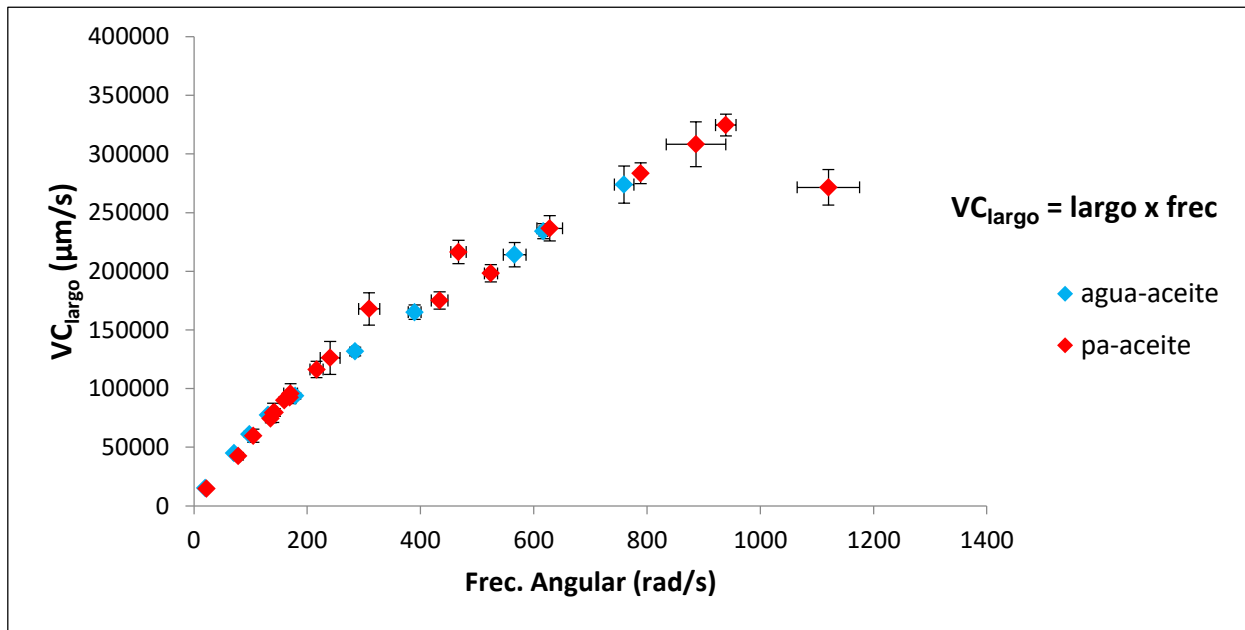


Figura 56-B. Gráfica de VC_{largo} vs Frecuencias para ambas interfases. La velocidad característica de cada flujo se determinó con el largo promedio de las microgotas multiplicado por su respectiva frecuencia angular. Significado del símbolo VC_{largo} , VC = Velocidad Característica y el subíndice _{largo} corresponde a la longitud que fue utilizada para obtenerla (largo promedio de las microgotas).

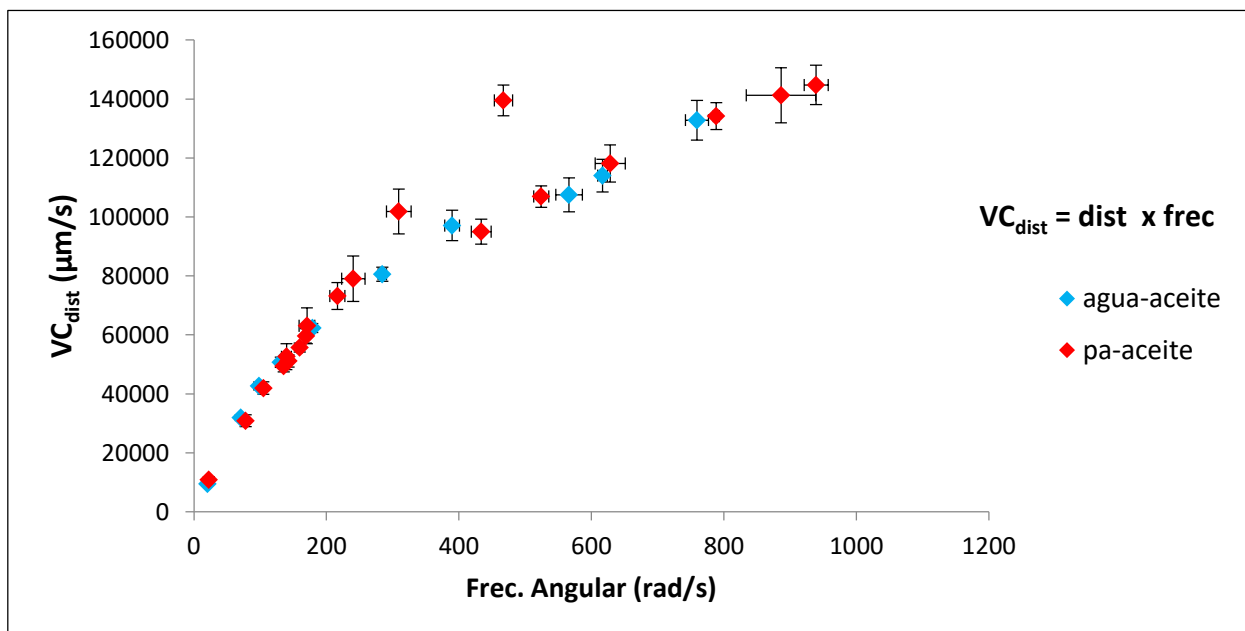


Figura 56-C. Gráfica de VC_{dist} vs Frecuencias para ambas interfases. La velocidad característica de cada flujo se determinó con la distancia promedio entre microgotas multiplicada por su respectiva frecuencia angular. Significado del símbolo VC_{dist} , VC = Velocidad Característica y el subíndice _{dist} corresponde a la longitud que fue utilizada para obtenerla (distancia promedio entre microgotas).

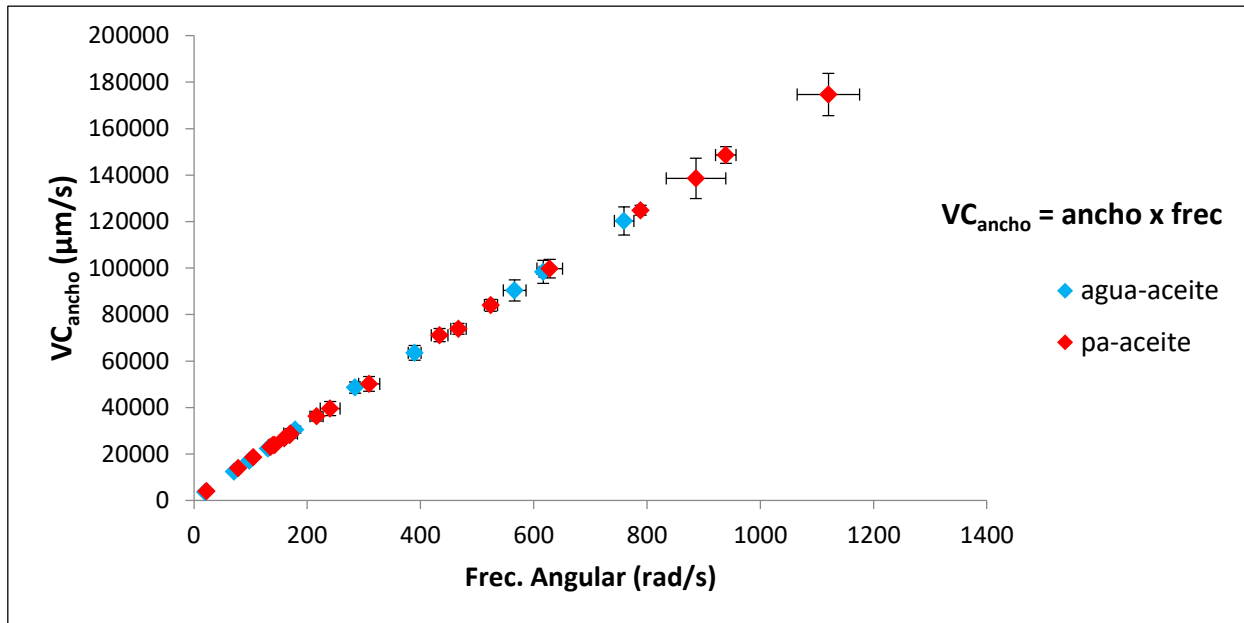


Figura 56-D. Gráfica de VC_{ancho} vs Frecuencias para ambas interfases. La velocidad característica de cada flujo se determinó con el ancho promedio de las microgotas multiplicado por su respectiva frecuencia angular. Significado del símbolo VC_{ancho}, VC = Velocidad Característica y el subíndice _{ancho} corresponde a la longitud que fue utilizada para obtenerla (ancho promedio de las microgotas).

De las 4 gráficas anteriores, la Figura 56-A, en donde la velocidad característica se obtuvo multiplicando la amplitud de oscilación por la frecuencia angular, tiene un comportamiento muy similar a la velocidad de oscilación (VRMS) de la Figura 54 con aproximadamente las mismas magnitudes. Si ahora la VRMS se divide entre la VC_{amp} y se grafica contra la frecuencia angular, se observa que para todas las frecuencias se obtiene un cociente cercano a uno para el caso del agua (Figura 56-E). Esto es indicativo de que el movimiento de la interfase aceite-agua tiene un solo modo que sigue el gradiente de presión de las gotas. En el caso de la solución de poliacrilamida, se nota un comportamiento menos homogéneo lo que sugiere una dinámica más compleja.

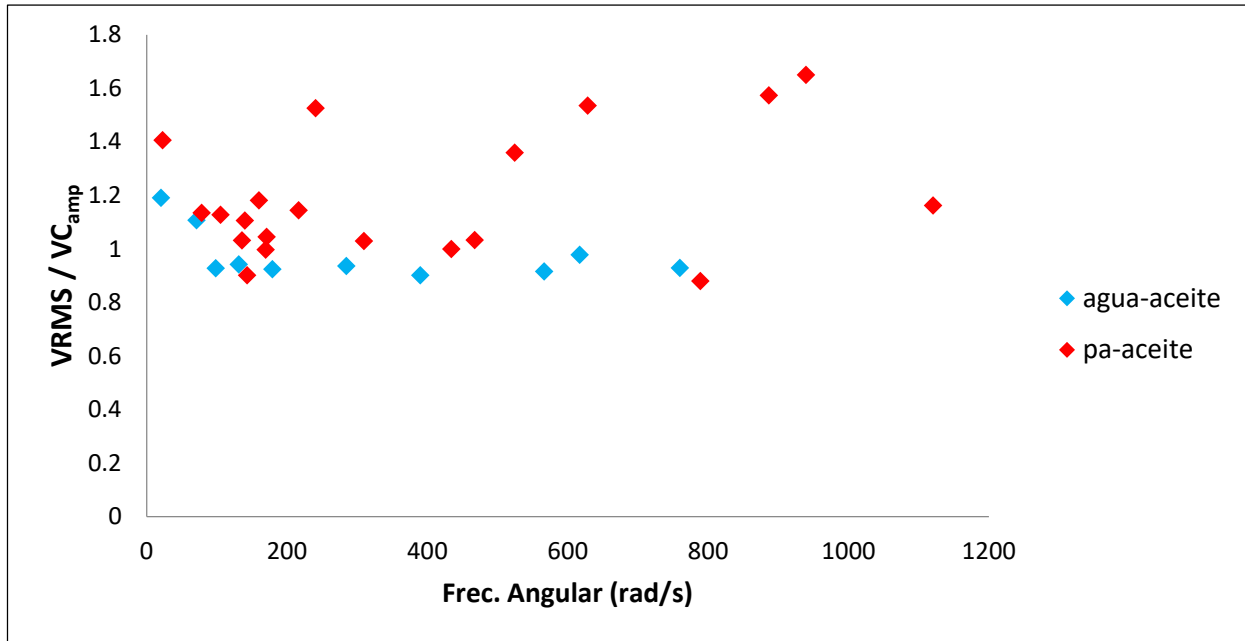


Figura 56-E. Gráfica de $VRMS/VC_{amp}$ vs Frecuencias para ambas interfases.

En las otras 3 gráficas restantes de velocidades características (56-B, 56-C y 56-D), se observa que las velocidades van aumentando monótonamente con la frecuencia angular y sus valores son entre 50 y 130 veces mayores que los de VRMS, lo que indica que las dimensiones de las microgotas (largo, ancho y distancia entre gotas), no están determinando la velocidad de la interfase. Estas 3 Figuras (56-B, 56-C y 56-D) nos muestran que las velocidades características que implican las dimensiones de las gotas son muy parecidas para ambos experimentos con distintas interfases y que con ello el sistema generador de gotas no se ve afectado por lo que sucede en la interfase.

5.4.2 Gráficas de VRMS / longitudes del Sistema vs Frecuencia Angular

En esta sección se realizó un análisis, en el cual se requirieron las mismas 4 longitudes del sistema que se utilizaron en la sección pasada. Consecutivamente, las VRMS de ambas interfases fueron divididas entre cada longitud y cada dato obtenido fue graficado en función de su respectiva frecuencia angular. Con esto se pudo confirmar las variables que influyen o determinan el comportamiento de la velocidad.

A continuación, se muestran estas gráficas:

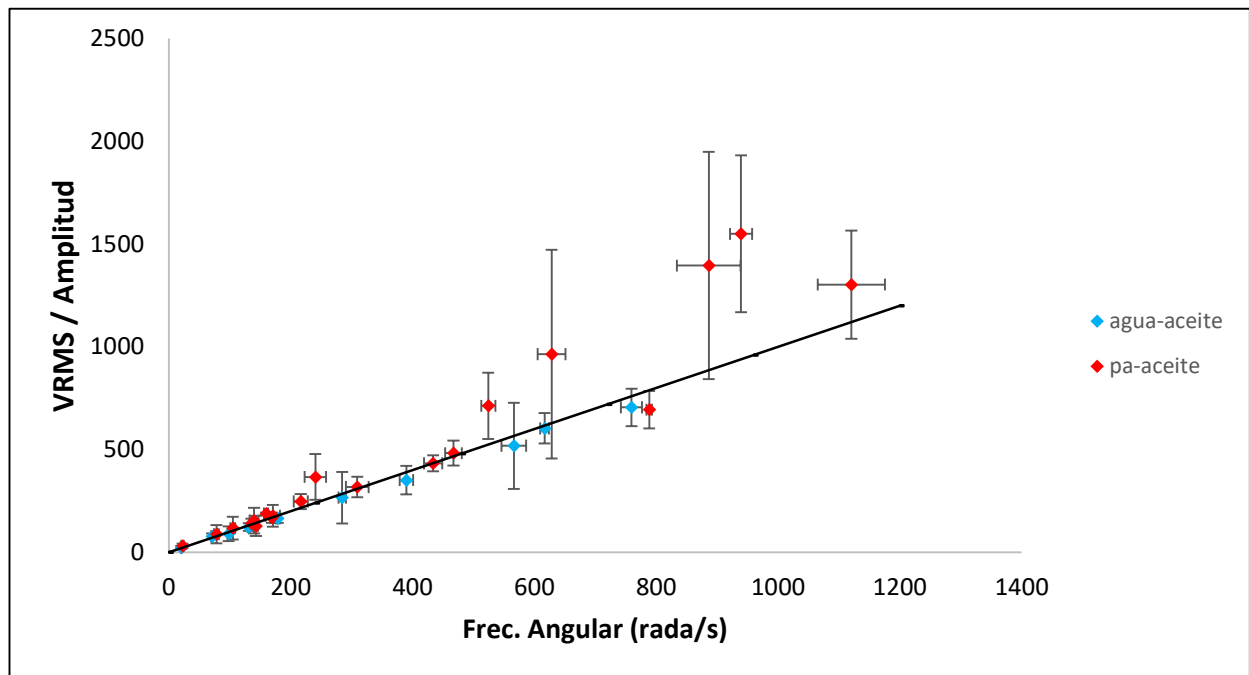


Figura 57-A. Gráfica VRMS / Amplitud de Oscilación vs Frecuencias para ambas interfases. Se muestra una línea con pendiente igual a 1 como referencia.

En la Figura 57-A, se observa una linealidad para los datos de ambas interfases, ya que al dividir la VRMS entre la amplitud de oscilación nos daría como resultado un valor cercano a los datos de frecuencia angular en el eje X. De esta manera, se pudo determinar que la amplitud de oscilación es una variable que influye en el comportamiento de la velocidad de ambas interfases.

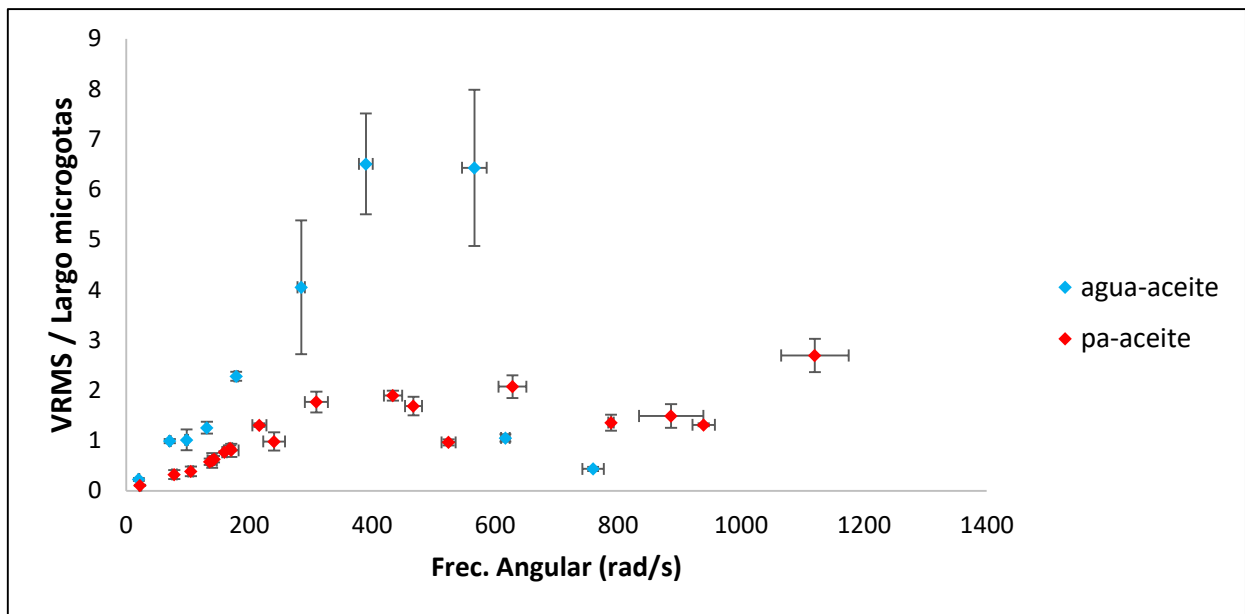


Figura 57-B. Gráfica VRMS / Largo de las Microgotas vs Frecuencias para ambas interfases.

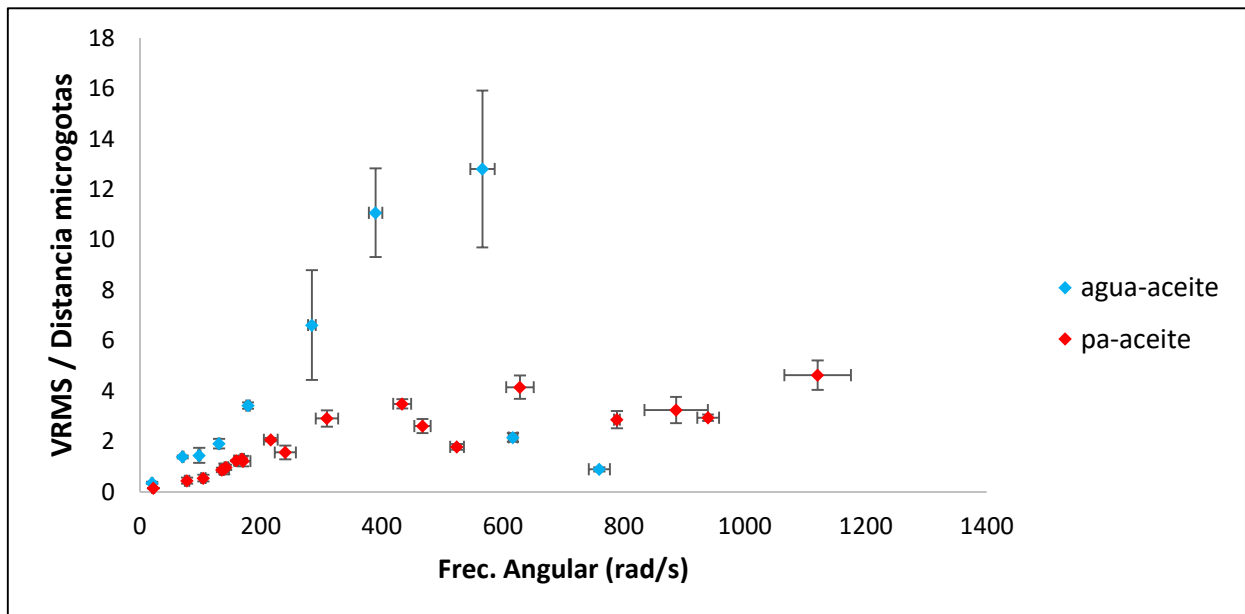


Figura 57-C. Gráfica VRMS / Distancia entre las Microgotas vs Frecuencias para ambas interfases.

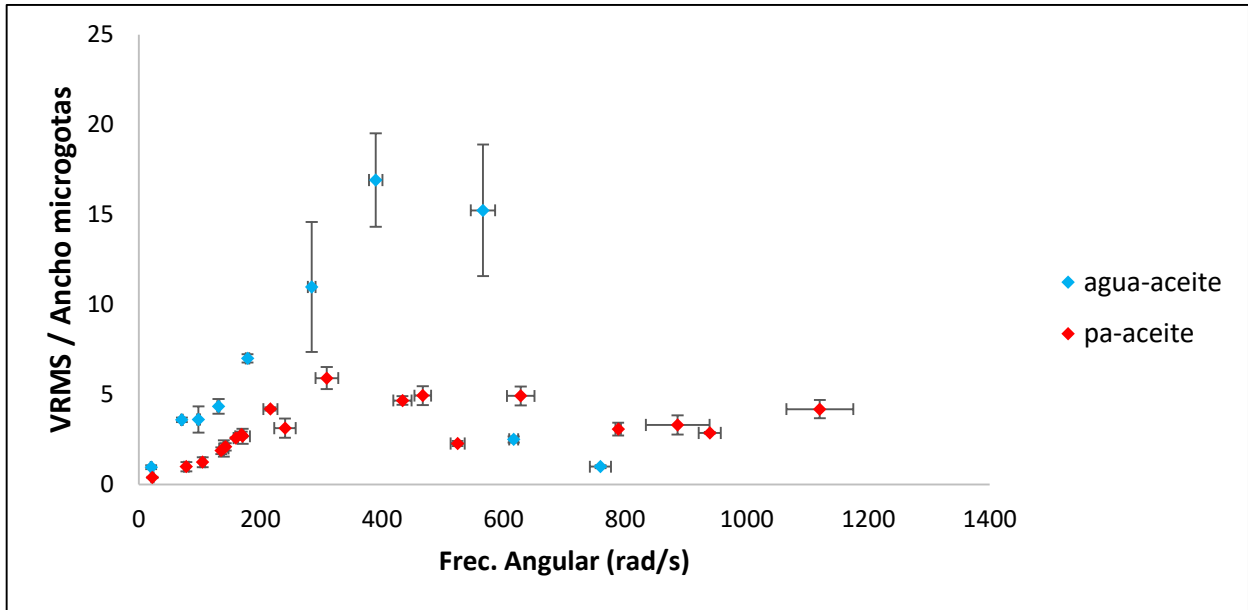


Figura 57-D. Gráfica VRMS / Ancho de las Microgotas vs Frecuencias para ambas interfaces.

En cambio, en las 3 gráficas restantes (57-B, 57-C y 57-D), se observa un comportamiento muy parecido a la gráfica de VRMS vs Frecuencia Angular (Figura 54), ya que al dividir la VRMS por las 3 longitudes restantes no se ve un cambio en la forma de la gráfica, esto indica que estas 3 longitudes no determinan el comportamiento de la velocidad de las interfaces.

5.4.3 Número de Womersley

El número de Womersley es un número adimensional que se utiliza para analizar flujos pulsados y relaciona la frecuencia de flujo con los efectos viscosos del sistema. Con este número se puede estimar la forma de los perfiles de velocidad de nuestros fluidos de estudio. Aunque el número de Womersley es característico de la dinámica de bulbo de un fluido (sin interfase), haremos el análisis usando la dinámica de la interfase que fue el objeto de estudio del presente trabajo.

El número de Womersley se calculó para los componentes de ambas interfases, a una temperatura de 23 °C, utilizando la siguiente ecuación:

$$Wo = \sqrt{\frac{\omega_d}{\omega_\eta}}$$

ω_d = Frecuencia angular de pulsado

ω_η = Frecuencia viscosa = $\eta / \rho a^2$

η = viscosidad ; ρ = densidad ; $a = R_H$ = Radio Hidráulico

Tomando en cuenta que nuestros canales son cuadrados, el radio hidráulico se calcula así:

$$R_H = L / \sqrt{\pi}$$

Posteriormente, se utilizaron los datos que pertenecen a los números de Womersley para construir las gráficas de número de Womersley vs Frecuencia Angular y VRMS vs número de Womersley que se muestran más adelante y con ellas poder analizar el perfil de velocidades que tienen ambas interfases.

De acuerdo con los perfiles de velocidad que se obtuvieron teóricamente para un flujo que se encuentra en un cilindro en el artículo [23] pudimos describir nuestros resultados. A continuación, se muestran los perfiles de velocidad que están en dicho artículo:

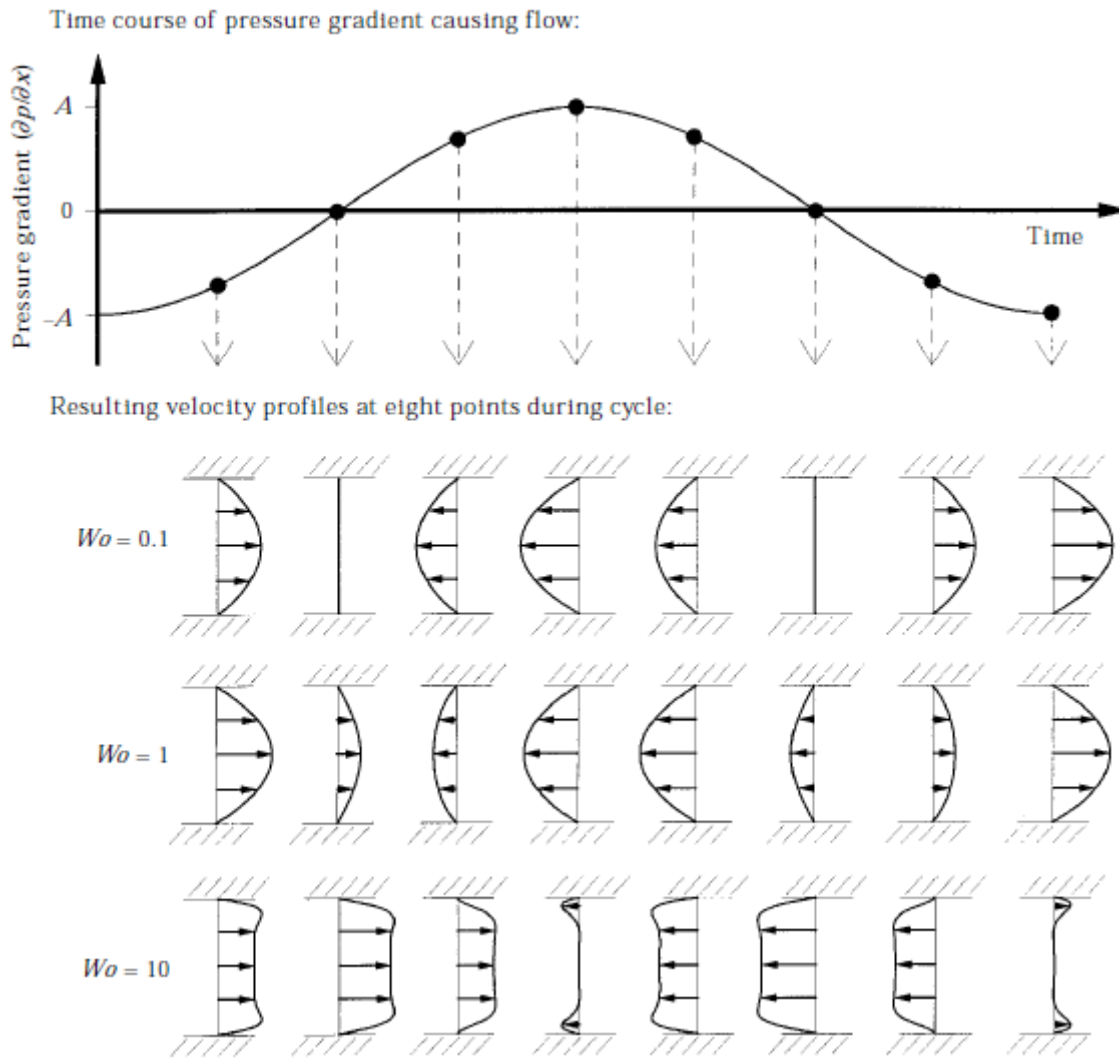


Figura 58. Perfiles de velocidad entre dos placas planas en ocho puntos en el tiempo durante un solo ciclo de un gradiente de presión de variación sinusoidal para tres valores del número de Womersley adimensional. La longitud de cada flecha horizontal indica la magnitud de la velocidad para esa posición en particular. La velocidad es adimensional porque está dividida entre la velocidad máxima (en cualquier lugar) durante un ciclo completo. A es una constante positiva. Tomada de [23].

En [23] se explica que cuando el número de Womersley es menor que 1, los perfiles de velocidad corresponden estrechamente al valor producido por el gradiente de presión que conduce al flujo. Por ejemplo, podemos observar que cuando el gradiente de presión es cero, la velocidad del fluido es despreciable en cada punto. En otras palabras, para $Wo < 1$, el fluido es perturbado a una frecuencia tal que todavía le permite desarrollar por completo el perfil de velocidades parabólico.

Cuando el número de Womersley = 1, los perfiles de flujo de velocidad presentan todavía la forma redondeada o parabólica que se muestran en el número de Womersley < 1 ,

pero comienzan a mostrar un retardo de fase con respecto al gradiente de presión. Por ejemplo, cuando el gradiente de presión es cero, se aprecia que el fluido aún se sigue moviendo.

A medida que el número de Womersley aumenta, el desfase se hace mucho más pronunciado y los perfiles de velocidad cambian de forma; la velocidad máxima ya no está centrada entre las dos placas y la amplitud de la velocidad disminuye drásticamente [23]. Además, como se muestra en la figura 59, a medida que la frecuencia angular aumenta (y también el número de Womersley), el flujo máximo (Q_{max}) disminuye de forma muy importante para números de Womersley mayores a 1.

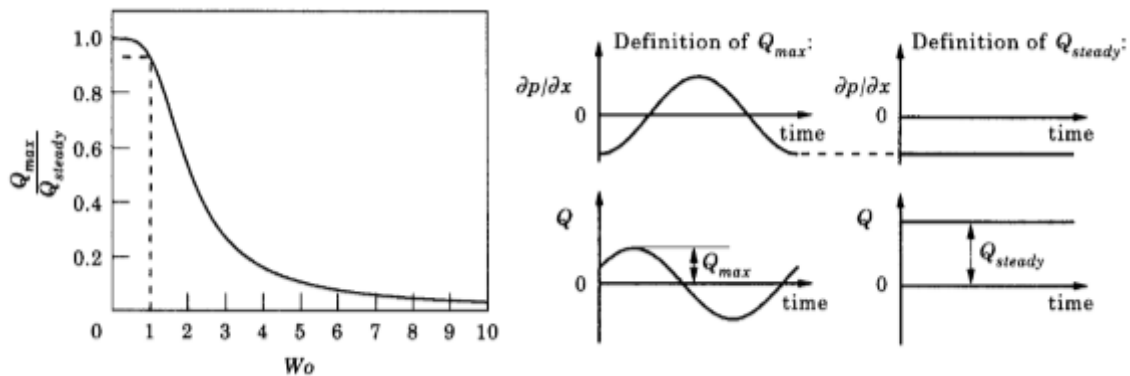


Figura 59. A medida que W_o aumenta, el máximo de flujo volumétrico, Q_{max} (la amplitud máxima del Q con variación sinusoidal), es una fracción cada vez más pequeña del valor correspondiente del flujo volumétrico que se obtendría con un gradiente de presión constante (Q_{steady}). Tomada de [23].

De acuerdo con la figura anterior, en nuestros experimentos se podría esperar que a números de Womersley mayores a 1, haya un desfase en el gradiente de presión creado por las microgotas que provoque que el flujo en el canal de la interfase disminuya y a su vez haya una disminución de la amplitud máxima de la velocidad de la interfase.

A continuación, se muestran las gráficas de número de Womersley vs. Frecuencia Angular y VRMS vs. número de Womersley para cada uno de los fluidos de las dos interfases estudiadas:

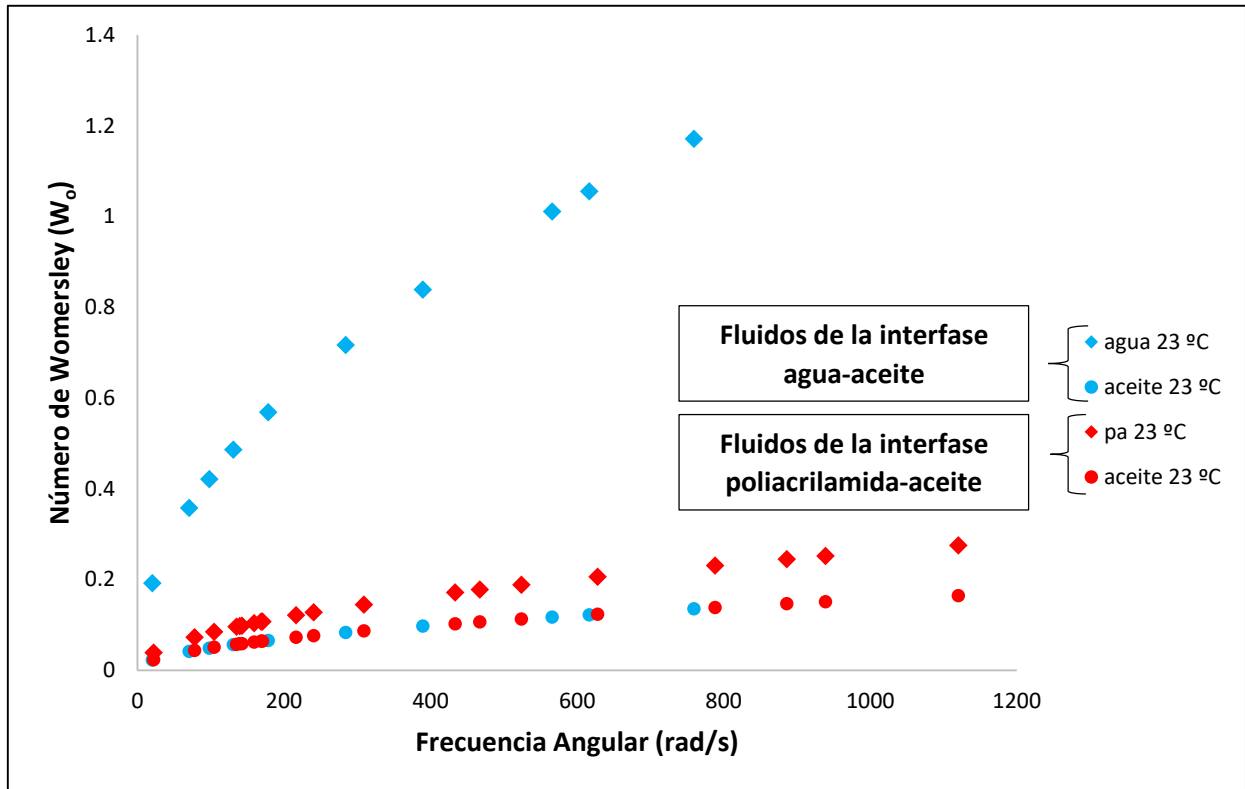


Figura 60. Gráfica de Número de Womersley vs Frecuencia Angular para cada uno de los fluidos que componen las dos interfaces.

Gráficas para los fluidos de la interfase agua-aceite:

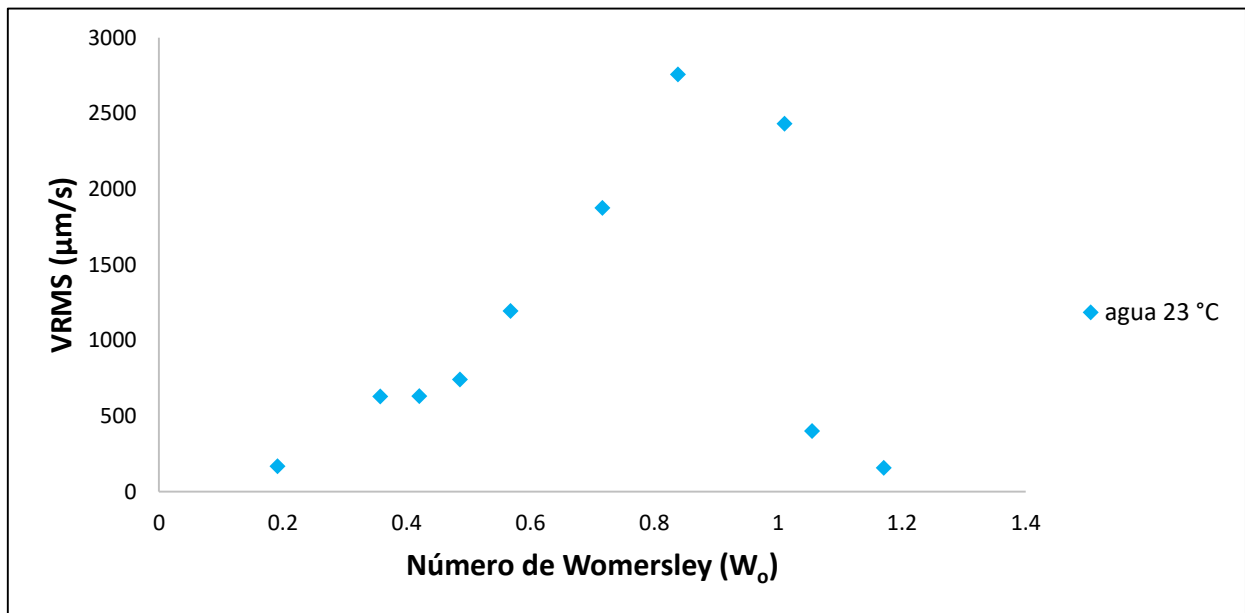


Figura 61-A. Gráfica de VRMS vs Número de Womersley para el agua a 23 °C.

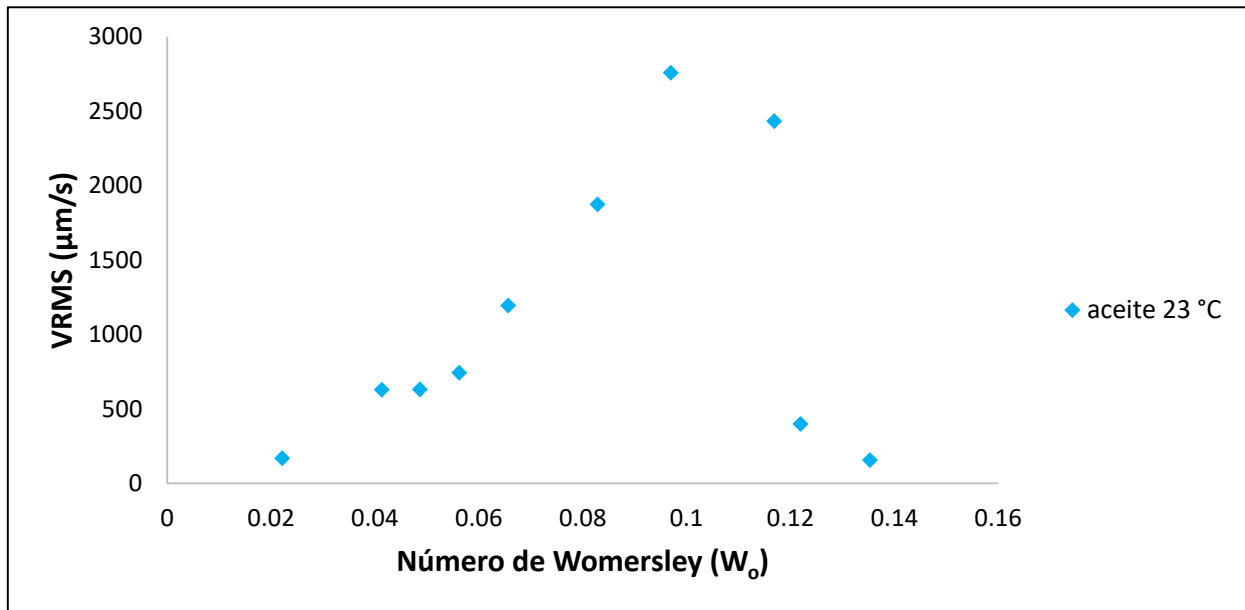


Figura 61-B. Gráfica de VRMS vs Número de Womersley para el aceite a 23 °C.

Gráficas para los fluidos de la interfase poliácridamida-aceite:

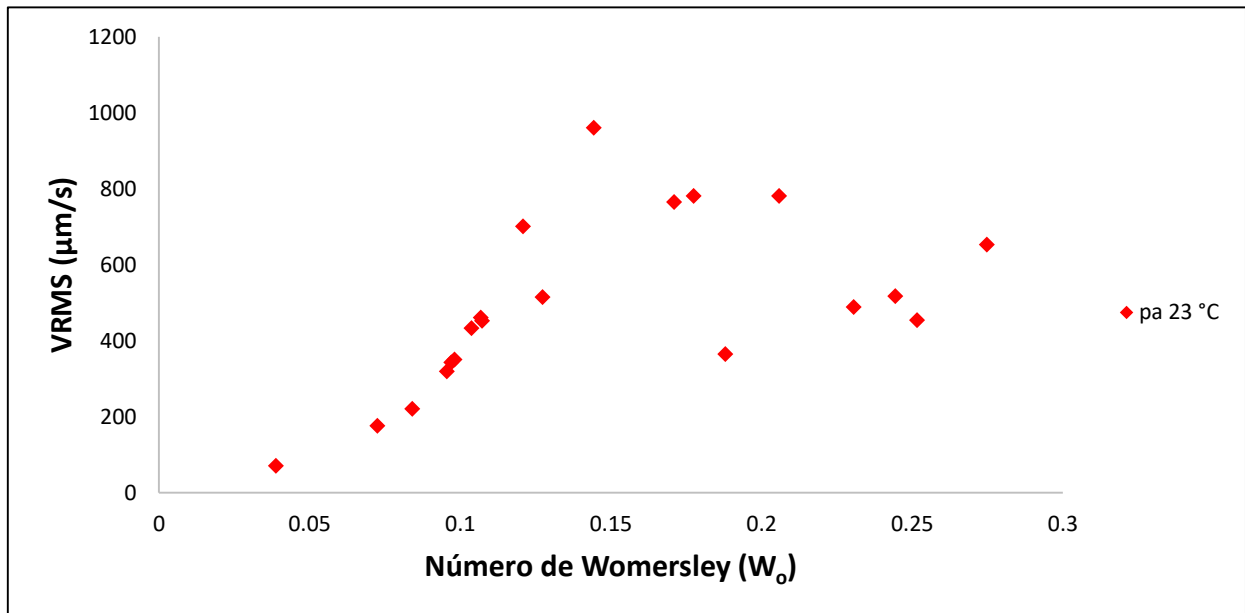


Figura 61-C. Gráfica de VRMS vs Número de Womersley para la poliácridamida a 23 °C.

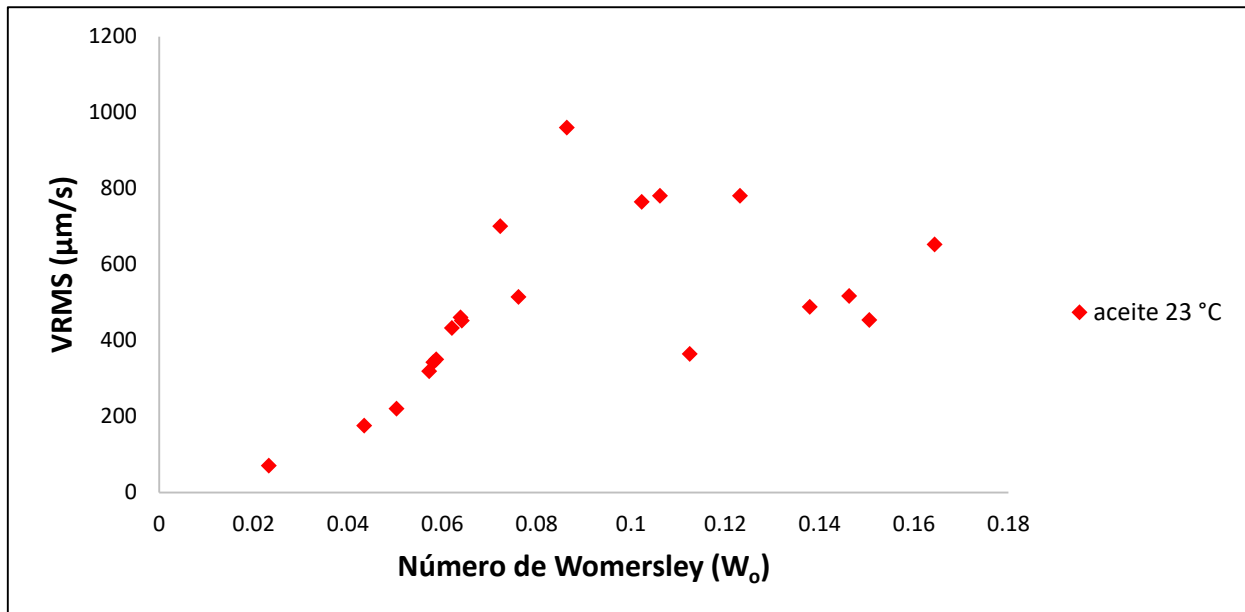


Figura 61-D. Gráfica de VRMS vs Número de Womersley para el aceite a 23 °C.

Para las gráficas pertenecientes a los fluidos de la interfase agua pura-aceite (Figuras 60, 61-A y 61-B), se observa que en la mayoría de los datos se tienen números de Womersley menores que uno. Además, se encontró que para números de Womersley menores que uno, el comportamiento que muestra la amplitud de oscilación de la interfase agua-aceite es constante (Figura 53) y la velocidad aumenta de manera lineal (Figuras 61-A y 61-B), por lo que se sugiere que el perfil de velocidades que se tiene es parabólico. Sin embargo, a las tres frecuencias más altas, se tienen tres datos con $W_o > 1.0$ y justamente en estos valores se observa un decremento muy importante en la amplitud y en la velocidad lo que implica una disminución importante en la amplitud máxima de flujo en el canal de la interfase. Quizás en nuestro sistema en estas condiciones exista un desfase importante entre el gradiente de presión y la velocidad.

En las gráficas relacionadas a los fluidos de la interfase poliacrilamida-aceite (Figuras 60, 61-C y 61-D), tanto para la poliacrilamida como para el aceite se obtuvieron valores del número de Womersley menores que 0.2 y aunque ambos fluidos son de naturaleza distinta, la velocidad no muestra un decremento tan abrupto a frecuencias altas (Figuras 61-C y 61-D) y se podría pensar que el perfil de velocidades en todo el intervalo de frecuencias es el parabólico.

6. Conclusiones

- En este trabajo se desarrolló un método novedoso para generar un gradiente de presión pulsado en una interfase fluida por medio de microgotas en un dispositivo de microfluídica. Con este sistema pudimos estudiar la dinámica de una interfase agua-aceite y la dinámica de una interfase solución de poliacrilamida-aceite.
- Al aumentar el flujo de las bombas en todos los experimentos, la frecuencia de producción de gotas aumenta. Este comportamiento es reproducible e independiente del tipo de interfase fluida (agua-aceite o solución de poliacrilamida-aceite). Esta característica es útil ya que nos permite saber cómo variar las frecuencias que se quieren explorar en un cierto experimento, a través de una variable fácil de controlar que es el flujo. Esto, sin importar la naturaleza de la interfase de estudio.
- El largo y ancho de las gotas, así como la distancia entre ellas (para cada frecuencia) son cantidades iguales para los experimentos con la interfase agua-aceite y la interfase poliacrilamida-aceite. Esto es conveniente, ya que en nuestros sistemas podremos imponer una frecuencia de gotas muy parecida con el mismo gradiente de presión pulsado independientemente de la naturaleza de la interfase fluida.
- Si se mantiene constante la relación de flujos de agua y aceite mineral, el largo y ancho de las microgotas producidas, así como la distancia entre ellas, disminuye al aumentar la frecuencia.
- Los resultados obtenidos en las gráficas de VRMS vs frecuencia angular y amplitud de oscilación vs frecuencia angular, muestran velocidades y amplitudes de oscilación mayores en la interfase agua-aceite que en la interfase poliacrilamida-aceite. Esto podría ser resultado de las diferencias en la viscosidad de los fluidos que conforman a las dos interfases.
- La velocidad característica que se obtuvo multiplicando la amplitud de oscilación de la interfase por la frecuencia angular muestra un comportamiento similar a la gráfica de velocidad de oscilación (VRMS) vs. frecuencia angular, lo cual sugiere que la amplitud de oscilación y la frecuencia angular son las mediciones que influyen en el comportamiento de la VRMS de ambas interfases.
- De acuerdo con las condiciones en las que trabajamos, el agua y el aceite que conforman la interfase agua-aceite (con la excepción importante de tres frecuencias altas), tienen números de Womersley menores que uno, indicando

que los fluidos desarrollarán un perfil de velocidad parabólico. Sin embargo, para las tres frecuencias más altas que tienen un $W_o > 1$ se podrían tener perfiles de velocidad más complicados.

- Para el caso de la interfase poliacrilamida-aceite, siempre se obtuvieron números de Womersley menores que 0.2, indicando que probablemente los fluidos desarrollarán un perfil de velocidad parabólico.

Referencias Bibliográficas

- [1] Hun Yunlong y Ghassan S. Kassab. "Pulsatile blood flow in the entire coronary arterial tree: theory and experiment". *AJP-Heart and Circulatory Physiology*, Vol. 291, 2006, PP: H1074-H1087.
- [2] Mark S. Slaughter, Joseph G. Rogers. "Advanced heart failure treated with continuous-flow left ventricular assist device". *The New England Journal of Medicine*, Vol. 361, 2009, PP: 2241-2251.
- [3] John Bustamante O., Sergio Mejía M. "Desarrollo de un prototipo de bomba de flujo pulsátil para caracterizar las condiciones hidrodinámicas en un ambiente de circulación extracorpórea". *Revista Colombiana de Cardiología*, Vol. 14, 2007, PP: 25-32.
- [4] Edgar J. Kates. "Motores diesel y de gas de alta compresión". Editorial Reverté, Tercera edición, PP: 30-34.
- [5] Interstate Natural Gas Association of America. "Interstate natural gas pipeline efficiency". October 2010, PP: 12-14.
- [6] Royce N. Brown. "Compressors: selection and sizing". Gulf professional publishing, Segunda edición, 1997, PP: 54-55.
- [7] Vipin Bhardwaj. "Pumps". National Drinking Water Clearinghouse, Tech Brief, Vol. 3, 2003, PP: 1-4.
- [8] Pedro Fernández Díez. "Bombas centrífugas y volumétricas". Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, PP: 1-2. [WWW].URL: http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/bombas-centrifugas-y-volumetricas.pdf
- [9] Thaddeus F. Wnek. "Pressure pulsations generated by centrifugal pumps". Warren Pumps Inc., Warren, Massachusetts. [WWW].URL: <http://www.warrenpumps.com/resources/Pressure%20Pulsations%20Generated%20by%20Centrifugal%20Pumps.pdf>
- [10] Patrick Tabeling. "Introduction to microfluidics". Oxford University Press, 1995.
- [11] Wen Zeng, Ian Jacobi. "Characterization of syringe-pump-driven induced pressure fluctuations in elastic microchannel". *Journal of the Royal Society of Chemistry, Lab Chip*, 15, 2015, PP: 1110-1115.

- [12] Sean M. Langelier, Dustin S. Chang, Ramsey I. Zeitoun, and Mark A. Burns. "Acoustically driven programmable liquid motion using resonance cavities". PNAS, Vol. 106, 2009, PP: 12617-12622.
- [13] Sung-Jin Kim, Ryuji Yokokawa. "Multiple independent autonomous hydraulic oscillators driven by a common gravity head". Nature Communications, Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited, Vol 6., 2015, PP: 1-7.
- [14] S. L. Anna, N. Bontoux and H. A. Stone. "Formation of dispersions using flow-focusing in microchannels". Applied Physics Letters, Vol. 82, Número 3, 2003, PP: 364-366.
- [15] Charles N. Baroud, Francois Gallaire. "Dynamics of microfluidic droplets". Lab Chip, 2010, 10, PP: 2032–2045
- [16] Mark J. Madou. "Fundamentals of microfabrication. The science of miniaturization". CRS Press, Segunda Edición, 2001.
- [17] Chang Liu. "Recent developments in polymer MEMS". Advanced Materials, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Vol. 19, 2007, PP: 3783-3790.
- [18] Mamdouh T. Ghannam, M. Nabil Esmail. "Rheological properties of aqueous polyacrylamide". Journal of Applied Polymer Science, 1998, 69, PP: 1587-1597.
- [19] Piotr Garstecki, Michael J. Fuerstman. "Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction-scaling and mechanism of break-up". Lab Chip, 2006, 6, PP: 437-446.
- [20] Aarón Morelos Gómez. "Regulación de regiones hidrofóbicas e hidrofílicas en materiales elastoméricos". UASLP, 2005, PP: 13-15.
- [21] Màximo Mitacc Meza. "Tópicos de estadística descriptiva y probabilidad". Editorial San Marcos, 1989, PP: 86-88.
- [22] J. R. Castrejón-Pita, J. A. del Río. "Experimental Observation of Dramatic Differences in the Dynamic Response of Newtonian and Maxwellian Fluids". Physical Review E., Vol. 68, 2003, PP: 1-5.

[23] Catherine Loudon y Antoinette Torsedillas. "The Use of the Dimensionless Womersley Number to Characterize the Unsteady Nature of Internal Flow", *J. theor. Biol.*, 1998, PP: 63-78.