



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

**Análisis de la ruptura de un filamento viscoso en
un medio turbulento**

Tesis

que para obtener el título de

Ingeniera Mecánica

presenta

Mónica Paola Martínez Ortíz

Director de tesis: Dr. Roberto Zenit Camacho

México D.F., Mayo de 2010

Jurado asignado:

PRESIDENTE	Dr. Baltasar Mena Iniеста
VOCAL	Dr. Roberto Zenit Camacho
SECRETARIO	Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz
1ER SUPLENTE	Dr. Gabriel Ascanio Gasca
2DO SUPLENTE	Dr. Enrique Soto Castruita

Lugar donde se realizó este trabajo:

Los experimentos para este trabajo se realizaron en el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. J. Roberto Zenit Camacho

SUSTENTANTE

Mónica Paola Martínez Ortíz

Agradecimientos

A Jakob por haberme apoyado tanto desde tan lejos. Gracias por haber inyectado el silicón (sin que vibrara el capilar), por haberme ayudado a reparar mis controles cada vez que un mosfet se quemaba y por siempre calmarme en mis momentos más estresantes. Wegen dir habe ich Liebe kennengelernt und ich hoffe, dass ich dir irgendwann zurückgeben kann was du mir gegeben hast. Ich liebe dich.

A mi papá por haber sido fuerte en los momentos más difíciles y enseñarme que aunque la vida es impredecible uno no debe abandonarse a sí mismo. Gracias por nunca rendirte y mostrarnos el verdadero significado de la familia.

A mi mamá por haberme amenazado aquella vez con ponerme a vender chicles en la esquina si no iba al kinder. Sin tu esfuerzo no hubiera llegado tan lejos.

A mi hermano Paco por enseñarme que uno se confunde más nunca se equivoca.

A mi hermana Gaby y a su alter-ego Paty por todas las risas que siempre compartimos.

A Fer por haber pisado popó de Pepper y pensar que Lalo se estaba pudriendo en clase, por haber llorado conmigo cuando Pera se graduó, por haberle dicho “mamá” a Nieves en un examen, por aquel viaje a San Diego. A Judy por Chacho y haberle tomado la mano a un niño saltimbanqui antes que yo, por regresar la bola después de recibir un balonazo, por nuestros sábados de martinis. Les agradezco a ambas por enseñarme lo que significa la palabra amistad y haber crecido conmigo todos estos años. Las quiero mucho.

A Bárbara por ser la persona más estresada que conozco. Sin ti la Facultad hubiera sido un aburrimiento total. No hubiera podido criticar al chimuelo de Hugo, ni hubiera platicado con alguien en Lemus, sólo tengo que decir que “Juan Sebastian ni es tan bueno”. Gracias por haberme dejado conocerte. Te has vuelto una de mis mejores amigas y mi Shakira-partner favorita.

A Diego por ser un gran amigo y haberme apoyado cuando más lo necesitaba. Gracias por estudiar conmigo en mi semestre de regreso a México y por llevarme pastel en todos mis cumpleaños. Se que puedo contar contigo siempre y aunque estos últimos meses nos hemos distanciado quiero que sepas que en mí siempre tendrás una amiga.

A Germán y a Joaquín porque sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible. Gracias por haberme abierto las puertas y haberme ayudado a sentar las bases de este proyecto. Les agradezco

por lo mucho que me enseñaron y por su amistad.

A mis compañeros del laboratorio: a Creeping Death por ser el elegido, a Adriana, a Fede por convertir al laboratorio en una Arena, a Mijitrator Machinery por todas tus frases y chistes no intencionales y aquellas risas incómodas, a Pocoyo ...uffff que más puedo decir, a Saaand-oval por no querer resolver matrices en LaTeX, a Charly por ser el único normal y calmado en el labo (al menos al parecer), a Monty por siempre matar con estilo, al invitado del laboratorio, Isaias, por predicar que si uno tiene hambre puede comerse el lunch y a Fabio por enseñarme la valiosa lección de que las cosas no se hacen solas, sin ti me hubiera vuelto loca tantas veces...gracias por toda tu ayuda a lo largo de este proyecto. Gracias a todos por haber sido tan solidarios y tan buenos amigos.

y?... a Roberto Zenit por creer en mí y haberme dado la oportunidad de aprender y alcanzar mis metas. Sin tu constante apoyo y motivación no estaría a punto de emprender una de las etapas más emocionantes de mi vida, gracias.

Este proyecto fue realizado en las instalaciones del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México. Agradezco el apoyo financiero otorgado por el proyecto PAPIIT IN109108 para su realización.

Índice general

Resumen	11
Motivación	13
Objetivos	15
1. Introducción	17
1.1. Conceptos básicos: Emulsiones	17
1.2. Métodos de formación de emulsiones	19
1.2.1. Formación espontánea	19
1.2.2. Inversión de fases	19
1.2.3. Aplicación de un esfuerzo cortante	21
1.3. Estabilidad de una emulsión	23
1.3.1. Sedimentación	23
1.3.2. Floculación	24
1.3.3. Coalescencia	24
1.3.4. Mecanismo de Maduración Coalescente de Ostwald	25
1.4. Regímenes	25
1.4.1. Formación y ruptura de filamentos de fluido viscoso	26
1.4.2. Formación y ruptura de gotas	28
1.5. Conceptos básicos: Turbulencia	28
1.6. Turbulencia homogénea e isotrópica	29
1.7. Arreglos experimentales de generación de turbulencia	30
1.7.1. Generación de turbulencia con decaimiento espacial	30
1.7.2. Generación de turbulencia con decaimiento temporal	31
2. Arreglo Experimental	35
2.1. Generación del Flujo Turbulento	35
2.1.1. Cámara de turbulencia	35
2.1.2. Control electrónico de la velocidad de las bombas	37
2.2. Sistema de inyección de fluido viscoso	39
2.3. Parámetros experimentales	40
2.3.1. Fluidos utilizados	40
2.3.2. Velocidades de inyección	40

3. Métodos de visualización de flujo	43
3.1. Velocimetría por imágenes de partículas (PIV)	43
3.1.1. Iluminación y sembrado de partículas	44
3.1.2. Adquisición de imágenes	45
3.1.3. Procesamiento de imágenes	45
3.1.4. Post-procesamiento de imágenes	45
3.2. Cámara de alta velocidad	46
4. Resultados	47
4.1. Caracterización del flujo turbulento	47
4.2. Visualización de los filamentos de fluido viscoso en un medio turbulento	54
4.3. Procesamiento de imágenes	62
4.4. Determinación de la elongación del filamento	65
4.4.1. Elongación característica del sistema	65
4.4.2. Deformación del filamento	68
5. Conclusiones	75
Bibliografía	76
i. Apéndice I	81
i. Apéndice II	83

Resumen

Este trabajo se presenta como la continuación del estudio preliminar del proceso de emulsificación mediante agitación, realizado por Federico Hernández [15]. La emulsificación es uno de los procesos industriales más importantes; sin embargo, la tecnología aún está basada en conocimientos empíricos. A pesar de que se han identificado los mecanismos mediante los cuales este proceso se lleva a cabo, no hay una explicación clara para la ruptura de filamentos de fluido viscoso que antecede a la formación de gotas. Con el objeto de esclarecer dicho proceso, se realizaron experimentos en la cámara de turbulencia isotrópica del Laboratorio de Reología (IIM, UNAM). Ésta fue modificada de acuerdo a las sugerencias de Mancilla [22] para generar un flujo quasi-isotrópico en el lugar donde sería inyectado un filamento de fluido viscoso. Asimismo, se caracterizó el flujo en la cámara de turbulencia y se comprobó su homogeneidad y carácter isotrópico.

De este modo, se inyectó un filamento de alta viscosidad en la cámara de turbulencia modificada y, con una cámara de alta velocidad, se visualizó el proceso de deformación del mismo para cuatro intensidades turbulentas y dos viscosidades del filamento. Mediante el procesamiento de imágenes realizado, se encontró que el decaimiento temporal del diámetro de los filamentos obedece un comportamiento exponencial. Asimismo, se calculó una elongación característica promedio para cada condición experimental, a partir de la cual se determinó un tiempo característico de ruptura para cada caso.

Motivación

A partir de 1861 en que se adoptó el término *coloide*, por Thomas Graham [2], para designar a aquellas dispersiones de partículas, gotas o burbujas de una fase dentro de una segunda fase continua, se han intentado esclarecer los procesos físicoquímicos que involucran su formación. La principal atracción de los sistemas coloidales es que tanto sus propiedades físicas como químicas difieren de aquellas de tipo molecular y macroscópico. De este modo, las interacciones superficiales entre ambas fases tienen una influencia significativa en las propiedades de cada especie coloidal.

Dependiendo del estado en que se encuentren las fases de un sistema coloidal se pueden generar gel, aerosoles, suspensiones o emulsiones. En este trabajo se tratará únicamente de aquellos coloides en los que ambas fases -la dispersa y la continua- son líquidas, es decir, de las emulsiones.

Actualmente, muchos de los productos de uso cotidiano son emulsiones o involucran dichas dispersiones dentro de su procesamiento. Esto se debe a que son capaces de trasladar sustancias solubles en fluidos oleicos o aceites de forma eficaz. De esta manera, las emulsiones cuentan con una gran variedad de aplicaciones en un amplio rango de disciplinas, productos y procesos industriales, desde alimentos básicos hasta agentes liberadores de fármacos

No obstante el predominante papel de estos sistemas en la industria contemporánea, los mecanismos mediante los cuales se forma una emulsión aún no han sido cabalmente entendidos. La principal dificultad es que se trata de sistemas termodinámicamente metaestables, en los que las propiedades resultantes dependen tanto de la composición de las fases, las condiciones termodinámicas existentes y el método de fabricación. Lo anterior ha provocado que el control de dichos procesos sea predominantemente empírico, lo que impone grandes restricciones en la optimización de la producción de emulsiones a nivel industrial.

Por esta razón, numerosas áreas de la física y la química se han dedicado a la comprensión de los mecanismos de formación de emulsiones. Hasta ahora se han podido identificar interacciones importantes -principalmente de carácter superficial- entre la fase dispersa y la continua, así como los mecanismos mediante los cuales se pierde la estabilidad y se destruye una emulsión. En este trabajo se estudia el proceso más simple de formación de emulsiones -aquel en el que se aplica un esfuerzo cortante- y ahondando en el mecanismo de ruptura de filamentos del fluido más viscoso, lo cual antecede a la formación de gotas.

Objetivos

- Visualizar la deformación de filamentos viscosos debido a la naturaleza turbulenta del flujo.
- Describir la evolución temporal del diámetro de los filamentos de fluido viscoso y establecer un tiempo de ruptura para cada condición experimental.
- Determinar los factores que rigen la ruptura de filamentos viscosos en un medio turbulento homogéneo.

Capítulo 1

Introducción

Una emulsión es una dispersión coloidal en la que un fluido se encuentra disperso en otro de distinta composición. La característica más atractiva de estos sistemas es la capacidad de transportar sustancias solubles en aceite mediante fluidos acuosos, los cuales tienen una viscosidad inferior. Esto se traduce en el transporte eficaz de fluidos que bajo condiciones ambientales presentarían un difícil manejo, como el residuo del petróleo, por ejemplo. Las ventajas que esto conlleva han sido aprovechadas por diversas industrias resultando en una gran cantidad de aplicaciones. Sin embargo, debido a la complicada naturaleza de estos sistemas, la cual se debe, principalmente, a su carácter inestable y a las numerosas condiciones que influyen en sus propiedades -composición, estabilidad, tipo de emulsificantes, método de producción, entre otras- aún no se ha logrado un entendimiento cabal acerca de estas especies coloidales. De esta manera, una gran parte de los procesos que involucran la formación de emulsiones se basan en conocimientos empíricos. La principal consecuencia es que no existe un control adecuado de las propiedades de las emulsiones formadas, de acuerdo a cada aplicación, ni una optimización eficiente de los procesos.

1.1. Conceptos básicos: Emulsiones

Una emulsión es un sistema heterogéneo formado por dos líquidos inmiscibles, en el cual uno de los fluidos se encuentra disperso en el otro en forma de gotas microscópicas o de tamaño coloidal (desde 1000 nm hasta 100 μm). En la mayoría de estos sistemas, uno de los fluidos es acuoso y el otro oleico y generalmente son referidos simplemente como agua y aceite (Figura 1.1). Asimismo, a la fase dispersa también se le llama interna y a la continua externa. Tomando en cuenta que la fase dispersa puede estar compuesta por cualquiera de estos dos fluidos -agua o aceite- se puede diferenciar entre dos tipos de emulsiones simples:

- Cuando el agua forma la fase continua y el aceite se encuentra disperso en esta, se tiene una emulsión de aceite en agua u *oil-in-water* (O/W).
- Cuando el aceite es el que forma la fase externa o continua y el agua la interna o dispersa se tiene una emulsión de agua en aceite o *water-in-oil* (W/O).

Existen también sistemas de emulsiones dobles. En este tipo de sistemas, la fase dispersa es, a su vez, la fase en la que una tercera fase se encuentra dispersa. De este modo, se tienen emulsiones de aceite en agua en aceite (O/W/O) y de agua en aceite en agua (W/O/W) (Figura 1.2).

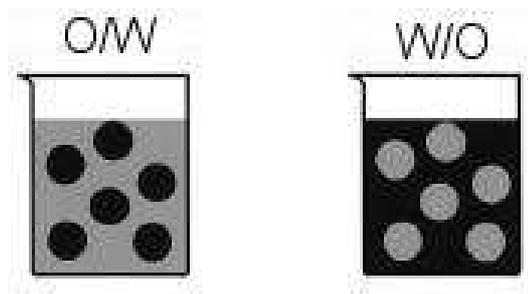


Figura 1.1: Sistemas de emulsiones simples.[28]

Normalmente, las gotas en las que la tercera fase está dispersa son del orden de micrómetros y pueden contener decenas de gotas de la tercera fase. Asimismo, existen otros sistemas de emulsiones mucho más complejos que los ya mencionados. Por ejemplo, se pueden llegar a formar emulsiones W/O/W/O, las cuales son comunes en la industria petrolera. Los sistemas de emulsiones descritos en este trabajo son los más simples. Sin embargo, pueden formarse emulsiones que además de agua, aceite y emulsificantes contengan partículas sólidas e incluso gases. Sin importar la complejidad del

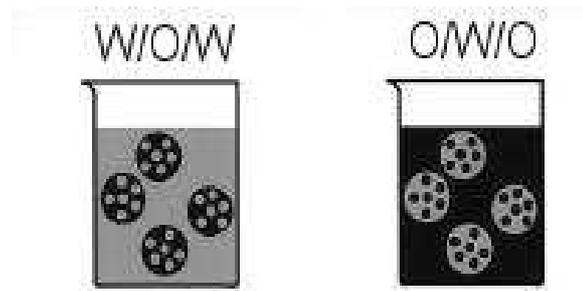


Figura 1.2: Sistemas de emulsiones múltiples.[28]

sistema, todas las emulsiones, a excepción de las de origen espontáneo, son termodinámicamente inestables y el tipo de emulsión que se forma depende tanto de la composición del sistema como del método de procesamiento. Para formar una emulsión es necesaria la aplicación de energía a ambos fluidos, que en un estado inicial se encuentran separados por una sola interfaz, con el propósito de provocar la ruptura de un líquido en el otro.

Lo que se busca normalmente con una emulsión, es tener un sistema metaestable que permita el transporte eficaz de sustancias hidrofóbicas (insolubles en agua) para facilitar diversos procesos. La eficiencia, en este caso, se entiende como la capacidad de estos sistemas de mantener la estabilidad cinética durante el tiempo requerido por la aplicación, tomando en cuenta que la energía administrada debe ser lo menor posible para que su empleo sea viable. Con este fin, se utilizan los llamados surfactantes. El papel más importante de estos agentes emulsificantes es facilitar la ruptura de un fluido en el otro, al disminuir la tensión interfacial entre los fluidos. De esta manera, el esfuerzo requerido para deformar y romper gotas del fluido disperso es menor.

Otro factor importante, que afecta en gran medida las propiedades de una emulsión, es la distribución del tamaño de las gotas que constituyen la fase dispersa. Este factor afecta en gran medida la estabilidad de las emulsiones; por lo que se busca tener monodispersidad. En otras palabras, se busca minimizar el rango de tamaños de las gotas presentes para evitar coalescencia

entre las mismas, lo que conlleva eventualmente a la destrucción de la emulsión.

1.2. Métodos de formación de emulsiones

Existen distintos métodos de formación de emulsiones, algunos de los cuales se explicarán a continuación. En casi todos ellos se aplica un esfuerzo externo, comúnmente mediante la agitación de los fluidos, para provocar la ruptura de un fluido en el otro. Asimismo, se utilizan emulsificantes, los cuales además de facilitar la formación de gotas contribuyen a la estabilidad del sistema.

1.2.1. Formación espontánea

La emulsificación espontánea es un proceso que no requiere de la provisión de energía para que ocurra, lo cual la hace atractiva para la industria. Sin embargo, a pesar de que este proceso fue descubierto en 1878, aún no se comprenden los mecanismos responsables del aumento del área interfacial mediante la dispersión de un líquido en el otro. Se lleva a cabo, como su nombre lo indica, espontáneamente debido a una inestabilidad, la cual puede tener un origen mecánico o químico. Existen distintas teorías sobre las condiciones que pudieran provocar la inestabilidad; como por ejemplo:

- Turbulencia interfacial: Según esta teoría, la emulsificación se lleva a cabo entre fluidos con baja tensión interfacial, lo que requiere una alta concentración de surfactante soluble en ambas fases. La distribución no uniforme de surfactante en la interfaz genera un gradiente de tensión interfacial. Esto, a su vez provoca una transferencia de masa en la interfaz, también conocido como el efecto de Marangoni. Lo que ocurre es que el fluido, en el que el surfactante presenta una mayor solubilidad, jala al otro; de manera que éste último comienza a fluir hacia el otro hasta que inestabilidades capilares o de Rayleigh provocan la ruptura del fluido en el que el surfactante tiene una menor solubilidad y, por tanto, su dispersión.
- Difusión: En este caso, la emulsificación tiene un origen químico y, a diferencia del caso anterior, puede llevarse a cabo en sistemas con altas tensiones interfaciales. La inestabilidad es provocada por el gradiente de concentración de un solvente soluble en ambas fases. Si, por ejemplo, se tiene alcohol como solvente y éste se encuentra en solución con aceite -fluido con el que el alcohol presenta menor solubilidad- y dicha solución entra en contacto con agua, el solvente comienza a difundirse en el agua, acarreado consigo pequeñas porciones de aceite. Esto provoca la formación de gotas de aceite en agua.

Este tipo de emulsificación ha sido aprovechada por la industria; sobre todo porque se tienen como resultado emulsiones monodispersas, obteniendo diámetros del orden de nanómetros. Es por eso que se utilizan para la producción de fármacos, cosméticos y recuperación de petróleo.

1.2.2. Inversión de fases

La emulsificación mediante la inversión de las fases es ampliamente utilizada debido a que no requiere de un gran insumo de energía para que ocurra. De igual forma, se llegan a producir emulsiones monodispersas y con gotas de alrededor de $1 \mu\text{m}$ de diámetro. La inversión de fases ocurre cuando la estructura de la emulsión se invierte, es decir, cuando la fase dispersa se convierte

en la continua y viceversa. Esta inversión cambia drásticamente las propiedades de la emulsión y depende en gran medida del método en que se produzca.

Existen dos maneras en que se da la inversión de fases: la transitiva y la catastrófica. La transitiva ocurre cuando el balance hidrofílico-lipofílico de la emulsión cambia. Esto sucede si cambian variables fisicoquímicas como la temperatura, la presión, o la concentración electrolítica de la emulsión. La inversión catastrófica es un proceso irreversible que se da cuando se modifica la composición, por ejemplo incrementando la fracción volumétrica de la fase dispersa. A diferencia de la inversión transitiva, la inversión catastrófica requiere de un mayor suministro de energía. Asimismo, el punto de inversión para este último tipo también depende de la intensidad de la agitación y de la velocidad con la que se agregue más líquido a la emulsión.

Método *PIT*

El método más frecuente con el que se logran invertir las fases de una emulsión es el llamado método de la temperatura de inversión de fases o PIT (*Phase Inversion Temperature method*). Se basa en el comportamiento de los surfactantes no iónicos y la correlación que existe entre la curvatura espontánea de éstos y el tipo de emulsión obtenida.

Es cierto que el tipo de emulsión tiene que ver con la solubilidad del surfactante que se utilice. Sin embargo, la solubilidad del surfactante puede alterarse si se alteran variables como la temperatura, la presión, la salinidad o la fracción volumétrica entre las fases. En el caso de los surfactantes no iónicos, al alterarse la temperatura, por ejemplo, la composición del surfactante cambia, lo cual hace que se modifique también su solubilidad. Resultados por Shinoda y Saito [30] muestran que al incrementar la temperatura, la cabeza de las cadenas de surfactante tiende a deshidratarse, lo que provoca que el surfactante sea más soluble en el aceite que en el agua. Por otro lado, al disminuir la temperatura, el surfactante muestra una solubilidad preferencial en el agua.

De esta manera, se tienen tres estados (Figura 1.3), dependiendo de la temperatura a la que se encuentre el sistema. A la temperatura PIT o de inversión de fases, las moléculas de surfactante se encuentran en equilibrio, es decir, su curvatura espontánea es cero. Debido a su arreglo lamelar, a esta temperatura, se tiene un sistema ternario de agua, aceite y surfactante. Además de las fases agua y aceite, se tiene una tercera fase cristalina, en equilibrio con las otras dos. A este estado se le denomina Winsor III. Por debajo de la temperatura PIT, las moléculas de surfactante tienen una curvatura espontánea negativa. En este sistema, denominado como Winsor I, se tiene aceite y una segunda fase compuesta por agua y surfactante. Por otro lado, por encima de la temperatura PIT, la curvatura de las moléculas de surfactante es positiva, con lo que se forma una fase acuosa y otra compuesta por aceite y surfactante. Este último sistema es referido como Winsor II.

Por tanto, la emulsión resultante de suministrar energía a los sistemas Winsor puede ser O/W (Winsor I) o W/O (Winsor II). Cabe mencionar que en el caso del sistema Winsor III, no existe una estructura preferencial, debido a la curvatura de las moléculas de surfactante. A esta temperatura, cualquier emulsión -ya sea O/W o W/O- es destruida inmediatamente, al coalescer la fase dispersa.

Actualmente este método es uno de los más utilizados, ya que permite controlar el tipo de emulsión a formar a partir del cambio de la temperatura del sistema. Esto es atractivo porque no es necesario agitar ambos fluidos para producir una emulsión ya que cerca de la temperatura PIT disminuye la tensión interfacial, promoviendo la ruptura de las gotas en otras más pequeñas. Sin embargo, esta temperatura debe ser traspasada rápidamente para evitar coalescencia y alcanzar una estabilidad cinética aceptable. Asimismo, el principal inconveniente de este método es que la

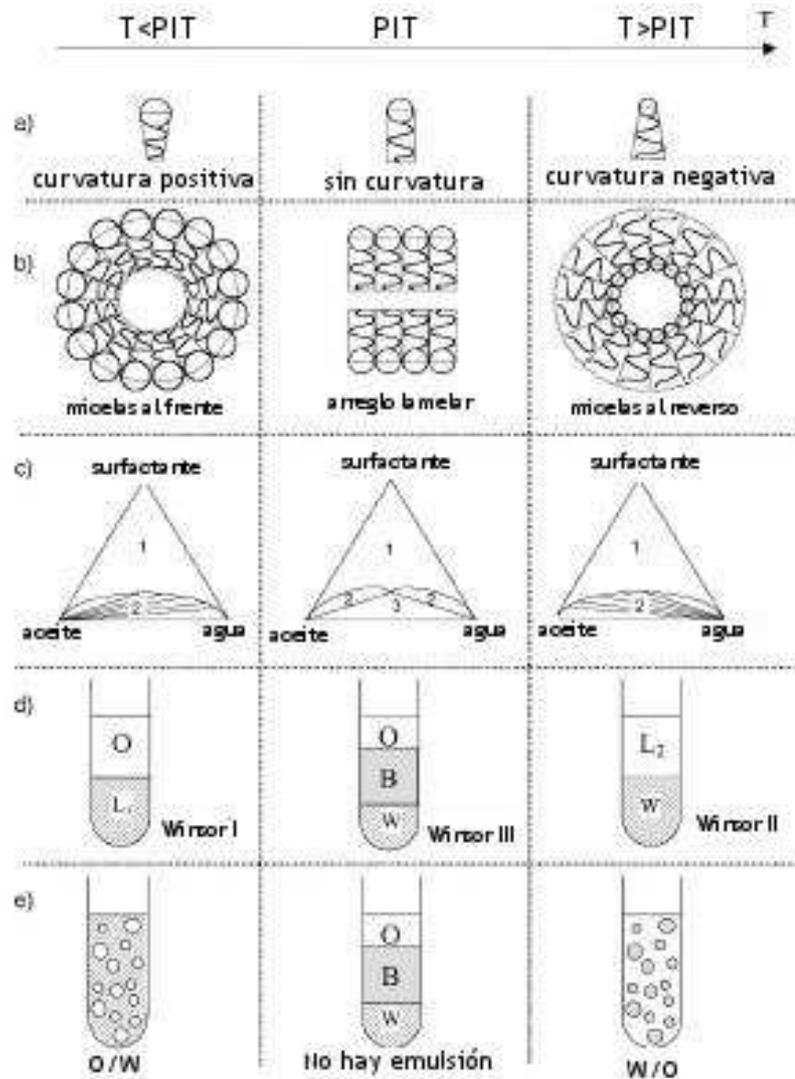


Figura 1.3: Efecto de la temperatura en sistemas con surfactantes no iónicos. (a) Curvatura y morfología del surfactante, (b) Arreglo del surfactante, (c) Diagrama de fases del sistema, (d) Fases existentes en equilibrio, (e) Emulsiones formadas. [19]

formulación es aplicable exclusivamente a emulsiones con surfactantes no iónicos.

1.2.3. Aplicación de un esfuerzo cortante

La emulsificación mediante la aplicación de un esfuerzo cortante es el método más común a nivel industrial debido a su simplicidad. En este proceso la energía necesaria es suministrada a través de la agitación de ambos fluidos mediante un mezclador. Existen distintas geometrías, algunas de las cuales se muestran en la Figura 1.4; sin embargo, el diseño más básico está compuesto por un conjunto de álabes unidos a un eje.

Mediante el mezclado, se puede generar flujo laminar o turbulento y la geometría empleada depende del tipo de flujo que se quiera lograr. Si se quiere obtener una emulsión monodispersa con un diámetro de gota pequeño, es recomendable generar un flujo turbulento. Con este fin, el diseño del agitador a emplear debe proporcionar un esfuerzo cortante alto; por lo que no tan sólo se suele

modificar la geometría de los álabes, sino también los ángulos de ataque y el número de aspas.



Figura 1.4: Ejemplos de las geometrías empleadas en el diseño de mezcladores. ©Pressure Products Industries, Milton Roy

En el arreglo más simple, de acuerdo a los resultados obtenidos por Hernández[15], al iniciar el mezclado se genera un gradiente de presiones que provoca la formación de una *copa* axisimétrica Figura 1.5 . Dicha diferencia de presiones entre la parte superior e inferior del agitador debe ser lo suficientemente grande para lograr que el fluido más viscoso se disperse uniformemente. Una vez rota la interfaz, varios autores [1] han observado la formación de filamentos del fluido más viscoso. Estos hilos o filamentos de fluido viscoso son sometidos a esfuerzos turbulentos e inestabilidades capilares, provocadas por el flujo.

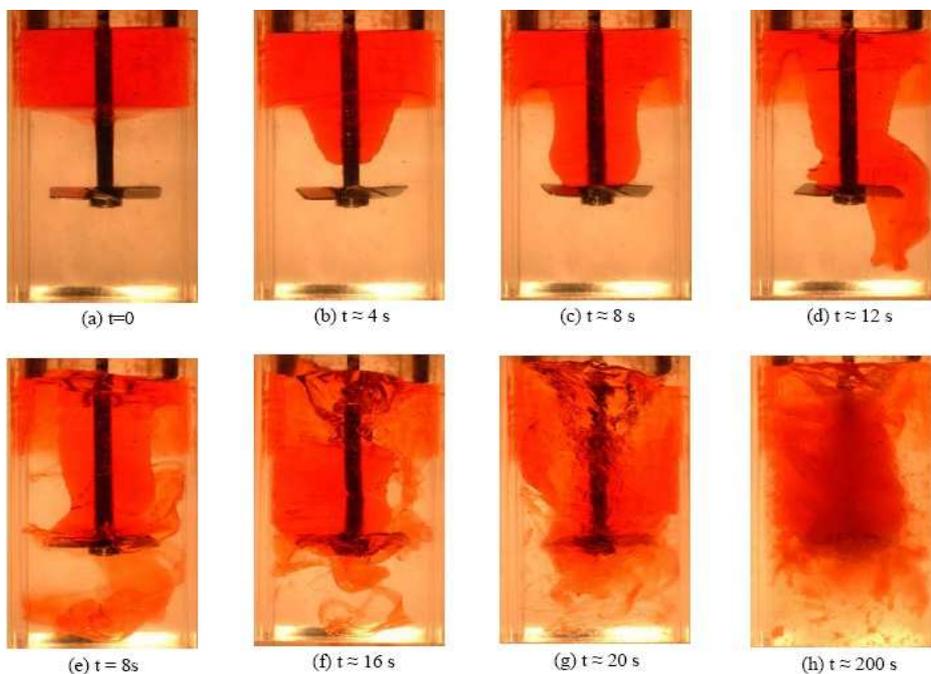


Figura 1.5: Serie de fotografías mostrando el proceso de formación de filamentos. [15]

El mecanismo mediante el cual se rompen los filamentos para formar gotas aún no está totalmente comprendido. Sin embargo, se sabe que la emulsificación mediante este método está altamente

relacionada con este mecanismo, principalmente porque la estabilidad del filamento determina si este se rompe o se une nuevamente con el resto del fluido. Asimismo, las gotas producidas por la ruptura son función de dicha estabilidad, así como el diámetro final de éstas.

Como resultado de este proceso, generalmente se tiene un rango amplio de la distribución del diámetro de las gotas de la fase dispersa, lo cual dificulta la obtención de una emulsión monodispersa. Esto se debe a que durante la emulsificación, la naturaleza turbulenta del flujo provoca que la fragmentación de las gotas y la recombinación de las mismas ocurra simultáneamente. Sin embargo, mediante la rápida absorción de surfactantes se han podido obtener emulsiones monodispersas con un diámetro de gota del orden de $1 \mu\text{m}$ [19], las cuales son empleadas en aplicaciones de alta tecnología -como biosensores, por ejemplo. De igual forma, la aplicación de un esfuerzo cortante controlado a una emulsión polidispersa produce sistemas monodispersos en grandes cantidades [23].

1.3. Estabilidad de una emulsión

Como se mencionó anteriormente, toda emulsión -a excepción de las emulsiones formadas espontáneamente- es termodinámicamente metaestable. Esto se debe al exceso de energía de Gibbs por cada gota en una emulsión, la cual no puede ser compensada por la entropía del sistema. En este marco, la estabilidad de un sistema disperso es un concepto cinético caracterizado por una escala de tiempo. En otras palabras, una emulsión se denomina como estable cuando no hay un cambio contundente en el número de gotas, distribución, o arreglo espacial de las mismas a lo largo de la vida de la emulsión, con duración de minutos, horas, días o años, dependiendo de la aplicación. A pesar de que se han identificado los mecanismos que producen la destrucción de las emulsiones, el alargar el tiempo de vida de una emulsión muchas veces resulta imposible. Esto se debe a que éste depende de la naturaleza del surfactante empleado, la composición de las fases y la fracción volumétrica entre ellas.

La metaestabilidad de una emulsión involucra fenómenos de distinta naturaleza que pueden ocurrir simultánea o consecutivamente, lo cual hace de la destrucción un escenario sumamente complejo. De esta manera, para comprender la metaestabilidad de una emulsión y los procesos que ocurren durante su destrucción, se deben analizar tanto los mecanismos de las inestabilidades a nivel microscópico, como los referentes a las distribuciones temporales y espaciales del sistema. Generalmente, en la desestabilización de una emulsión dada, intervienen al menos dos de los cuatro mecanismos existentes: la sedimentación o cremación, la floculación, la coalescencia y el mecanismo de maduración coalescente de Ostwald.

1.3.1. Sedimentación

Este mecanismo se caracteriza por el desarrollo de un gradiente de concentraciones en la dirección vertical, el cual se manifiesta por la formación de una capa concentrada de gotas en la parte superior del sistema, sin cambio en la distribución del tamaño de las gotas. A este proceso se le denomina sedimentación si ocurre en una emulsión O/W, o cremación para un sistema W/O. De este modo, la causa de que se pierda la estabilidad de una emulsión a causa de este proceso es la diferencia de densidades entre las fases. La fase más ligera tiende a concentrarse en la parte superior, favoreciendo la formación de cúmulos. Estos últimos, tienden a recombinarse en uno solo y son sujetos a una segunda inestabilidad, la floculación.

La sedimentación o cremación en emulsiones es reversible y puede inhibirse mediante la reducción del tamaño de gota promedio, la reducción de la diferencia de densidades entre las fases o incrementando la viscosidad de la fase continua. Asimismo, el mezclado puede revertir este proceso, al menos por algún tiempo.

1.3.2. Floculación

La floculación es el resultado de la atracción de van der Waals entre las gotas que forman la fase dispersa y se da con mayor facilidad en emulsiones polidispersas. La atracción de van der Waals es universal para todos los sistemas dispersos y es inversamente proporcional a la separación entre las gotas. Cuando esta atracción es mayor a la repulsión entre las gotas, éstas tienden a aproximarse formando agregados, los cuales pueden ser compactos o presentar una estructura expandida tipo gel. En emulsiones muy concentradas, la formación de este tipo de estructura puede llegar a estabilizar la emulsión. Cabe señalar que aunque las gotas se encuentren muy cercanas unas a otras, la fase continua sigue formando una interfaz delgada entre las mismas.

Este mecanismo puede ser reversible o irreversible, dependiendo de la fuerza de atracción descrita. Asimismo, la floculación facilita la cremación; ya que los agregados que se forman mediante la floculación tienden a aglomerarse en la parte superior rápidamente. La velocidad de cremación depende directamente del radio efectivo de las gotas presentes; de esta manera, el radio efectivo de un cúmulo siempre será mayor al de una gota individual, haciendo que la velocidad de cremación sea mayor. De esta manera, la floculación se da con mayor facilidad en emulsiones con un tamaño de gota pequeño y la cremación es significativa en emulsiones con tamaño de gota grande.

Recientemente se ha aprovechado este mecanismo como medio para formar emulsiones monodispersas. Esto se lleva a cabo a partir de la floculación y posterior cremación de sistemas polidispersos. Asimismo, se ha comprobado que el exceso de surfactante en un sistema monodisperso provoca la formación de aglomerados, es decir, la floculación. Una manera de inhibir este mecanismo destructivo es mediante el suministro de surfactantes iónicos, lo cual estabiliza electrostáticamente la emulsión al incrementar la energía repulsiva entre las gotas.

1.3.3. Coalescencia

La coalescencia es el proceso mediante el cual dos gotas se aproximan a tal grado que la capa de fase continua separándolas se adelgaza y la interfaz de ambas gotas se rompe, provocando su unión para formar una gota de mayor tamaño. Esto generalmente ocurre cuando se tienen aglomerados o durante la difusión Browniana.

A diferencia de los mecanismos previamente mencionados, este es irreversible y es el responsable de la reducción del área superficial total. Está caracterizado por dos etapas: la primera, en la que se da el adelgazamiento de la película de fase continua entre las gotas de emulsión, y la etapa de ruptura de la superficie de la fase dispersa. El adelgazamiento de la fase continua entre las gotas de emulsión depende de la hidrodinámica del flujo de fluido continuo y de las fuerzas actuando a través de dicha película. Mientras que la ruptura de la película superficial de las gotas depende de las fluctuaciones del grosor y de las propiedades mecánicas de la misma.

Existen varias maneras de prevenir la aparición de coalescencia en una emulsión: el aumento de la repulsión entre las gotas de fase dispersa y la generación de gotas pequeñas. Esto último debido a que gotas de menor tamaño son menos susceptibles a presentar fluctuaciones de tipo superficial y, por lo tanto, es menos probable que coalescan.

1.3.4. Mecanismo de Maduración Coalescente de Ostwald

Este mecanismo, también referido en la literatura como destilación isotérmica o difusión molecular, se presenta como resultado de la diferencia de solubilidad que existe cuando se tienen gotas de distintos tamaños. Las gotas de menor tamaño tienen mayor presión laplaciana y mayor solubilidad. Como consecuencia, el material contenido en las gotas de menor tamaño tiende a disolverse y difundirse a través de la fase continua, para recombinarse en gotas de mayor tamaño. De este modo, las gotas más pequeñas reducen su tamaño mediante la difusión molecular, provocando un aumento en las dimensiones de las gotas más grandes y, por lo tanto, una reducción del área interfacial.

De acuerdo a lo anterior, este mecanismo debería provocar la formación de una sola gota de fase dispersa; sin embargo esto no ocurre, ya que la tasa de crecimiento de las gotas decrece al aumentar el promedio del tamaño de las mismas. Existen varias técnicas para inhibir este mecanismo, entre las cuales destacan: la adición de un componente insoluble en la fase continua y la modificación de la película interfacial mediante el empleo de surfactantes.

1.4. Regímenes

Como se ha mencionado en este capítulo, los métodos de formación de emulsiones son numerosos y difieren entre sí en distintos aspectos. Sin embargo, un factor importante que debe tenerse en consideración es el tipo de régimen de flujo que se tiene. Asimismo, es útil distinguir entre los métodos en los que no se tiene un efecto de pared (*unbounded flow*) y en los que se tiene un flujo altamente confinado.

En los métodos en que no se tienen efectos de pared, las fuerzas en el sistema suelen ser viscosas o inerciales. De este modo se pueden diferenciar tres regímenes:

1. Flujo laminar (LV): En este caso el sistema se caracteriza por tener un flujo laminar, el cual provoca que se tengan esfuerzos cortantes interactuando entre cada gota y la fase continua.
2. Flujo turbulento (TV): Si se tiene un flujo turbulento en el cual los remolinos más pequeños son de un orden de magnitud mucho mayor a las gotas de fase dispersa, éstos ejercen esfuerzos cortantes en las gotas en dirección a la interfaz.
3. Flujo turbulento inercial (TI): Si el flujo turbulento está caracterizado por tener remolinos de un orden de magnitud comparable con el de las gotas, las fuerzas inerciales causan la ruptura de estas últimas. Dichas fuerzas, se deben a fluctuaciones de presión en el líquido y actúan principalmente en dirección perpendicular a la superficie de las gotas.

Por otro lado, en los métodos donde se tiene un flujo confinado, prevalece el régimen laminar, designado como LB. Existe otro régimen, denominado régimen de inyección, el cual prevalece si las gotas son directamente inyectadas a la fase continua mediante un capilar.

Independientemente del régimen que se tenga, la variable más importante a analizar es la intensidad de las fuerzas que estén interactuando, ya que ésta determina el tamaño de gota que se tendrá como resultado final. En el caso de cualquier régimen de flujo turbulento (TV o TI), por ejemplo, ésta puede ser expresada por la energía de disipación. De este modo, una intensidad alta se traduce en gotas pequeñas.

Actualmente, en sistemas simples como O/W, el régimen más importante es el flujo turbulento inercial (TI), debido a su gran número de aplicaciones. A continuación se dará una breve descripción de los principales mecanismos que participan en la formación de un sistema coloidal mediante este régimen, dando un mayor enfoque a la etapa de ruptura de filamentos de fluido viscoso, que es el principal interés de este trabajo.

1.4.1. Formación y ruptura de filamentos de fluido viscoso

En la Sección 1.2.3 de este capítulo se describió el método de formación de emulsiones mediante la aplicación de un esfuerzo cortante. En la serie de fotografías presentadas en dicha sección, se resumen los distintos escenarios que forman parte del proceso de emulsificación mediante este método:

1. Debido a la diferencia de presiones por encima y por debajo del mezclador, dependiendo de la velocidad angular del mismo, se forma una copa simétrica de fluido viscoso.
2. Posteriormente, la copa va descendiendo y, como resultado, pierde la simetría hasta romperse.
3. En cuanto sucede lo anterior, comienzan a formarse filamentos de fluido viscoso debido al dominio de esfuerzos cortantes en el flujo. Algunos de estos hilos se elongan y se rompen; mientras que otros se recombinan con el resto del fluido viscoso.
4. La ruptura de filamentos viscosos resulta en la formación de gotas de fase dispersa, las cuales, por lo general, tienen un amplio rango de tamaños dentro de la misma emulsión.

El proceso de formación de filamentos depende de la magnitud de los esfuerzos cortantes presentes. Una vez formados, los filamentos se elongan debido a la naturaleza turbulenta del flujo y es su estabilidad el factor clave para el desarrollo del proceso de emulsificación. De esta manera, a partir del inicio de su formación, los filamentos se deforman hasta alcanzar un radio tan pequeño que los efectos interfaciales cobran importancia. Asimismo, las perturbaciones propias del flujo provocan el desarrollo de inestabilidades ondulatorias en la superficie de los filamentos.

La estabilidad del filamento está determinada en gran medida por el número de capilaridad, el cual está definido como la razón entre el esfuerzo cortante local y el esfuerzo interfacial:

$$Ca = \frac{aII}{\sigma},$$

donde II es el esfuerzo cortante local, a es el radio característico de las gotas en la fase dispersa y σ es la tensión interfacial.

De este modo, la competencia existente entre la tensión interfacial y el esfuerzo cortante determina si dichas inestabilidades se atenúan o amplían. En un estado inestable, los filamentos se rompen para formar un arreglo de gotas que constituyen la fase dispersa, mientras que en un estado estable el filamento permanece y se une al resto del fluido viscoso.

Ruptura de filamentos en un medio estacionario

Analizar y entender el proceso de ruptura de los filamentos ha sido de gran interés; ya que la formación de emulsiones en este régimen de flujo está directamente relacionada con este proceso. En las primeras investigaciones realizadas en esta materia, se supuso un filamento viscoso

aislado en un medio con velocidad nula. Los primeros estudios han sido referidos a Savart[13] y, posteriormente, a Plateau[13][14]. Ambos analizaron la inestabilidad de un filamento infinitamente largo, despreciando su viscosidad. De acuerdo con los resultados publicados por Plateau[13][14], el sistema se vuelve inestable si la longitud de onda de la perturbación en el filamento es mayor a π veces el diámetro del mismo. Entonces, a mayor longitud de onda las perturbaciones crecen más rápidamente, debido a que hay una mayor reducción del área superficial. A pesar de que estos resultados fueron significativos para su tiempo, las suposiciones del problema dejan fuera la dinámica del mismo.

A finales de 1800, Rayleigh[26][27] introdujo la descripción dinámica del problema mediante la teoría lineal de la estabilidad. En su análisis, consideró un filamento cilíndrico de fluido incompresible sujeto a fuerzas capilares, descartando el efecto del fluido alrededor del filamento. Mediante el concepto de la inestabilidad máxima, Rayleigh mostró que para una perturbación cualquiera, un cierto número de ondas inestables comienzan a propagarse por la superficie del filamento. Asimismo, la onda responsable de la ruptura del filamento es la que tiene una mayor tasa de crecimiento. Los resultados de Rayleigh concordaron con los de Plateau en que el sentido de la inestabilidad del sistema depende de la longitud de onda de las perturbaciones. Asimismo, asumiendo que la viscosidad domina sobre la inercia y despreciando el efecto del fluido alrededor del filamento, la ruptura ocurre más rápidamente si la longitud de onda de las perturbaciones es mayor que el radio inicial del filamento.

Posteriormente, Tomotika[33] generalizó el estudio realizado por Rayleigh, al considerar la viscosidad tanto del filamento como del fluido alrededor de éste. En su análisis, relacionó la tasa de crecimiento de la perturbación con las propiedades de ambos fluidos, considerados newtonianos e incompresibles, el diámetro del filamento y la longitud de onda de la perturbación mediante las ecuaciones de movimiento. Sus resultados indicaron que si la relación de viscosidades entre ambos fluidos no es cero ni infinito, la inestabilidad máxima del sistema ocurre a una longitud de onda determinada de la perturbación inicial en el filamento. Con lo anterior, Tomotika demostró que la ruptura de filamentos tiene una relación inmediata con la formación de gotas de un tamaño específico en la emulsión. De igual forma, se mostró que las perturbaciones en la superficie del filamento crecen exponencialmente, dependiendo de la tensión interfacial, la viscosidad de la fase continua y la razón de viscosidades entre ambos fluidos.

Ruptura de filamentos en un medio no estacionario

La estabilidad de filamentos en flujos de tipo extensional y de cortante simple aún no ha sido cabalmente comprendida. Se ha demostrado que en el caso de tener un flujo bajo la influencia de un esfuerzo cortante, éste suprime e incluso puede llegar a estabilizar completamente tanto la inestabilidad hidrodinámica de Rayleigh como la inestabilidad termodinámica en el filamento[10]. Asimismo, en estudios recientes se ha reportado que a pesar de que en flujos confinados se da una mayor deformación, los filamentos estables alcanzan una mayor longitud[24]. De este modo se ha concluido que para este tipo de flujo el confinamiento estabiliza los filamentos. Por otro lado, en estudios donde no se tienen efectos de pared se ha visto que los filamentos se estabilizan debido a los esfuerzos cortantes tan solo para un cierto rango de valores de la razón de viscosidades en el sistema [14].

El análisis de la ruptura de filamentos de fluido viscoso en regímenes turbulentos aún se encuentra en desarrollo [13]. Esto se debe principalmente a la complejidad intrínseca del flujo. En flujos

turbulentos, la tasa de alargamiento y la orientación del filamento se encuentran relacionadas y cambian temporalmente [19], lo que dificulta tanto la realización de modelos teóricos como análisis de tipo experimental.

1.4.2. Formación y ruptura de gotas

La fragmentación de los filamentos de fluido viscoso provoca la formación de gotas. En el caso del régimen turbulento, dependiendo de la intensidad de turbulencia del flujo, las gotas formadas se deforman y se fragmentan a su vez. La inestabilidad en este caso está relacionada con el número de capilaridad y la razón de viscosidades entre la fase continua y la viscosa. Dependiendo de dichos factores es posible determinar un valor crítico de la capilaridad por encima del cual las gotas son inestables, lo que se traduce en su fragmentación.

Existen dos mecanismos mediante los cuales las gotas de la fase dispersa pueden fragmentarse: la ruptura binaria y la capilar. El primero es el caso más simple y ocurre cuando una gota se rompe para formar dos del mismo tamaño. Este procedimiento se repite consecutivamente hasta alcanzar un tamaño de gota que resista las condiciones hidrodinámicas del flujo. La ruptura capilar, en cambio, provoca que las gotas se elonguen para formar un pequeño filamento, el cual se fragmenta para formar muchas gotas “hijas”. De este modo, se forman un mayor número de gotas en un solo evento. El tipo de mecanismo de ruptura que se presente depende de las propiedades del flujo y de la razón de viscosidades entre ambas fases.

1.5. Conceptos básicos: Turbulencia

Como se mencionó en la sección anterior, la formación de emulsiones a nivel industrial se lleva a cabo comúnmente en el régimen de flujo turbulento. La característica más importante de este tipo de flujo es que el campo de velocidades varía significativa e irregularmente, tanto temporal como espacialmente. Estos flujos tienen las siguientes propiedades:

- **Irregularidad:** El campo de velocidades varía de manera irregular, más no aleatoriamente, con respecto al tiempo y al espacio. La irregularidad del flujo imposibilita la descripción determinista del mismo, por lo que se han desarrollado métodos estadísticos para su estudio.
- **Difusividad:** Esta propiedad es, sin duda, la más atractiva para los métodos que utilizan este régimen de flujo en la formación de emulsiones. Los flujos turbulentos tienen la habilidad de transportar y mezclar fluido más eficientemente que los flujos laminares. Asimismo, además de incrementarse la tasa de transferencia de masa, se incrementan las tasas de transferencia de momento y de calor.
- **Vorticidad:** La turbulencia es tridimensional y se caracteriza por sus altos niveles de vorticidad fluctuante. Una propiedad importante es que la vorticidad del flujo se mantiene a sí misma.
- **Disipación:** Este factor es el responsable de que los flujos turbulentos requieran de la administración de energía para mantenerse. La turbulencia es disipativa debido a que la deformación generada por los esfuerzos cortantes viscosos incrementa la energía interna del fluido, lo cual provoca una disminución en la energía cinética del flujo. Entonces, para contrarrestar las pérdidas viscosas y prevenir el decaimiento de la turbulencia, se requiere de la administración constante de energía al flujo.

- Continuidad: La turbulencia es un fenómeno continuo. Las escalas más pequeñas producidas por este tipo de flujo son varios órdenes de magnitud mayores a las escalas moleculares.

El flujo turbulento se origina gradualmente a partir de inestabilidades presentes en flujos laminares, las cuales ocurren a altos números de Reynolds. La turbulencia se encuentra gobernada por las ecuaciones de la mecánica de fluidos; sin embargo, la aleatoriedad y no linealidad de las ecuaciones provocan que no se cuente con ninguna solución general a problemas que involucren este tipo de flujo.

La descripción estadística de la turbulencia se deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes, mediante la descomposición propuesta por Reynolds. De esta manera, los términos de velocidad son reemplazados por la descomposición de sus valores promedio y las fluctuaciones sobre el mismo:

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i) + u'_i(x_i, t), \quad (1.1)$$

donde $\bar{u}_i(x_i)$ es el valor promedio de la velocidad y $u'_i(x_i, t)$ es la fluctuación. El promedio temporal de la velocidad está definido como:

$$\bar{u}_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_i dt \right] \quad (1.2)$$

Una vez que se ha realizado la sustitución descrita, se promedian todas las ecuaciones de balance resultando:

$$\rho \frac{\bar{D}\langle U_j \rangle}{\bar{D}t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \langle p \rangle \delta_{ij} - \rho \langle u_i u_j \rangle \right], \quad (1.3)$$

donde los términos entre corchetes representan la suma de los esfuerzos viscosos, isotrópicos (relativos al campo de presión promedio) y los turbulentos o de Reynolds, respectivamente. Cabe mencionar que los esfuerzos viscosos dependen de la transferencia de momentum a nivel molecular, mientras que los turbulentos dependen de la transferencia de momentum del campo de velocidad fluctuante.

1.6. Turbulencia homogénea e isotrópica

Debido a la complejidad que conlleva el carácter fluctuante de la turbulencia, su análisis se ha enfocado al estudio del caso más simple, el flujo turbulento homogéneo e isotrópico. Este concepto es idealizado, ya que no existe un método perfecto para reproducir este tipo de flujo de manera exacta. Sin embargo, supone una simplificación importante ya que las propiedades promedio del flujo dependen únicamente de la posición. Asimismo, al ser isotrópico, se supone una simetría direccional de dichas propiedades a lo largo del tiempo.

Esta simplificación ha permitido el análisis de procesos que se llevan a cabo en este tipo de régimen, tales como la emulsificación. Se han desarrollado una variedad de arreglos experimentales para producir turbulencia homogénea quasi-isotrópica. Cada uno de dichos instrumentos, algunos de los cuales se presentan a continuación, son caracterizados mediante los siguientes parámetros estadísticos:

- Velocidades medias. Debido a la naturaleza fluctuante y aleatoria de la turbulencia, estos valores son muy pequeños (menores a un 10%) en relación a las fluctuaciones, o velocidades rms.

- Velocidades rms (root mean square velocities). Se refieren al segundo momento estadístico o desviación estándar:

$$u' = \sqrt{\text{var}(U)} = \langle u^2 \rangle^{\frac{1}{2}}, \text{ donde } u = U - \langle U \rangle \quad (1.4)$$

- Razón isotrópica. Es la razón entre las velocidades rms en dos direcciones: u'/v' . Ésta, en el caso de un flujo turbulento isotrópico, es la unidad.
- Curtosis (K). El cuarto momento estadístico no tiene ningún significado físico; sin embargo, el comportamiento de un flujo turbulento isotrópico está representado por una curtosis igual a tres.

1.7. Arreglos experimentales de generación de turbulencia

Como se mencionó en la sección anterior, mediante el modelo de turbulencia homogénea e isotrópica, se han podido entender los mecanismos básicos de flujos turbulentos más complejos. Mediante este marco teórico se han realizado estudios numéricos y experimentales para descifrar los procesos que este régimen implica. Por medio de simulaciones numéricas se han obtenido descripciones detalladas y precisas de los fenómenos turbulentos; sin embargo, aún no se ha encontrado un método experimental que recree la suposición de flujo turbulento homogéneo e isotrópico.

Los arreglos experimentales propuestos en la literatura logran producir flujos turbulentos homogéneos y cercanamente isotrópicos. Todos ellos se pueden clasificar en dos grupos, de acuerdo a cómo se genere la turbulencia, los cuales serán descritos a continuación.

1.7.1. Generación de turbulencia con decaimiento espacial

Los primeros intentos de realizar un arreglo experimental que generara un flujo turbulento homogéneo e isotrópico forman parte de esta categoría. En general, se trata de túneles con un tipo de rejilla incorporada (Figura 1.6). La rejilla empleada es preferentemente activa u oscilante, ya que ésta incrementa la intensidad de turbulencia del sistema. Sin embargo, esto implica pérdidas significativas de la isotropía. Independientemente del tipo de rejilla, en este tipo de sistemas no se requiere de una longitud considerable para que el flujo se desarrolle y sea cercanamente isotrópico [8]. Otro factor importante es que el decaimiento de energía del flujo se da en la dirección longitudinal del túnel. Esto resulta en la no homogeneidad del flujo en dicha dirección.

La mayor desventaja de este tipo de arreglos es que la rejilla resulta en la generación de un flujo secundario con una velocidad media relativamente pequeña ([17]). Asimismo, en este tipo de arreglos no es posible alcanzar Reynolds turbulentos de gran magnitud, ya que esta depende directamente de las características del túnel de viento o agua en uso. Como se ha mencionado, estos sistemas se emplean para generar turbulencia con decaimiento espacial, aunque en algunas ocasiones se ha generado turbulencia con decaimiento temporal al detener el flujo[8].

Variaciones al sistema mencionado incluyen la incorporación de una segunda rejilla oscilante a cierta distancia de la primera ([31]). Esto se ha utilizado para compensar el decaimiento espacial generado por la primera rejilla y se ha demostrado que es posible obtener una región con turbulencia homogénea entre ambas rejillas oscilantes. Otra modificación incorpora cuatro rejillas montadas en un tanque con agua, las cuales giran en dirección opuesta ([20]). A pesar de que mediante este

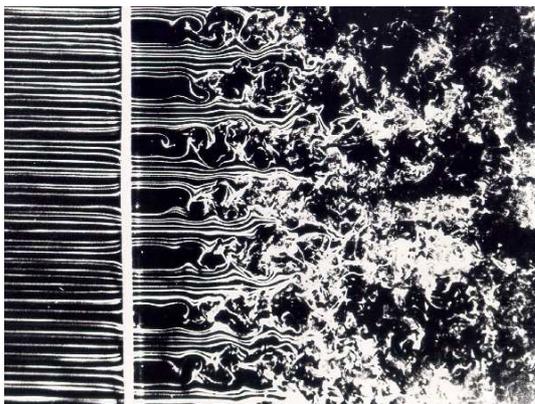


Figura 1.6: Turbulencia generada mediante la incorporación de una rejilla pasiva en un túnel de viento [34].

último arreglo es posible alcanzar valores de Reynolds turbulentos más altos, el flujo medio no es pequeño comparado con las fluctuaciones.

Asimismo, otro tipo de arreglo en esta categoría no utiliza rejillas, sino chorros de agua. En uno de ellos, la turbulencia es generada mediante un arreglo de nueve chorros al fondo de un tanque con agua, el cual tiene la superficie superior libre [35]. La velocidad de los nueve chorros se varía aleatoriamente y es lo que provoca un flujo turbulento en el centro del tanque. Aunque el flujo generado por este arreglo es homogéneo en dos dimensiones y quasi-isotrópico, deben tenerse hasta 64 chorros para mejorar la isotropía del sistema.

1.7.2. Generación de turbulencia con decaimiento temporal

La búsqueda de métodos alternativos de generación de turbulencia llevaron a la formación de este segundo grupo. Éste se caracteriza por arreglos confinados en un tanque o cámara, la cual es generalmente simétrica y en cuyo centro se genera una región turbulenta homogénea y, en algunos casos, prácticamente isotrópica. Uno de los primeros arreglos de este tipo fue creado por Birouk et al. [4]. El diseño experimental fue innovador, ya que no se requería de un túnel de viento o agua para la generación de turbulencia. La cámara elaborada consistía de ocho ventiladores pequeños en cada una de las esquinas de un tanque cúbico, todos apuntando hacia el centro. Además de la simplicidad del sistema, se alcanzaron Reynolds turbulentos altos, comparables con los obtenidos por Liu et al. [20]

Otro estudio significativo fue el realizado por Hwang e Eaton[17]. Basados en el diseño propuesto por Birouk, construyeron una cámara similar; sin embargo, en lugar de utilizar ventiladores acoplaron un sistema de inyección de chorros de aire. De esta manera, mediante la sustitución de partes mecánicas por bocinas lograron obtener un sistema de generación de turbulencia más robusto y compacto (la región de análisis consistía de 40 mm^3) que permitiera la introducción de trazadores de flujo sólidos.

El arreglo experimental es muy semejante al propuesto por Birouk et al. (Figura 1.7). Se tienen ocho bocinas, las cuales impulsan aire hacia el centro de la caja, a través de pequeños orificios, provocando la convergencia de ocho chorros de aire en el centro, lo que se traduce en un flujo turbulento quasi-isotrópico. Además, mediante este arreglo se alcanzaron un Reynolds turbulento y una intensidad de turbulencia mayores que en arreglos anteriores.

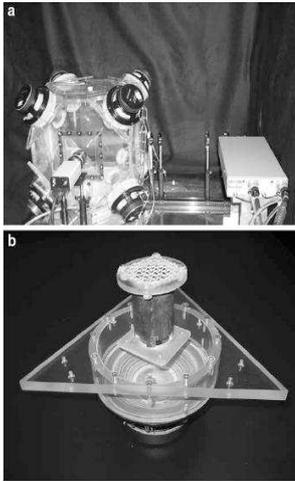


Figura 1.7: Arreglo experimental diseñado por Hwang e Eaton. (a) Cámara de turbulencia, (b) Sistema de inyección de aire.[17]

Sin duda el diseño de Hwang e Eaton a inspirado la evolución de arreglos posteriores, incluyendo el utilizado para la ejecución del presente trabajo. De esta manera, otro arreglo interesante y muy similar al empleado es el desarrollado por Goepfert et al.[12]. Continuando con la propuesta de Hwang e Eaton, la cámara de turbulencia abierta desarrollada cuenta con seis bocinas posicionadas en un marco cúbico (Figura 1.8). Mediante este diseño no sólo se redujo el número de bocinas necesarias, sino también se eliminaron por completo los posibles efectos de pared presentes.

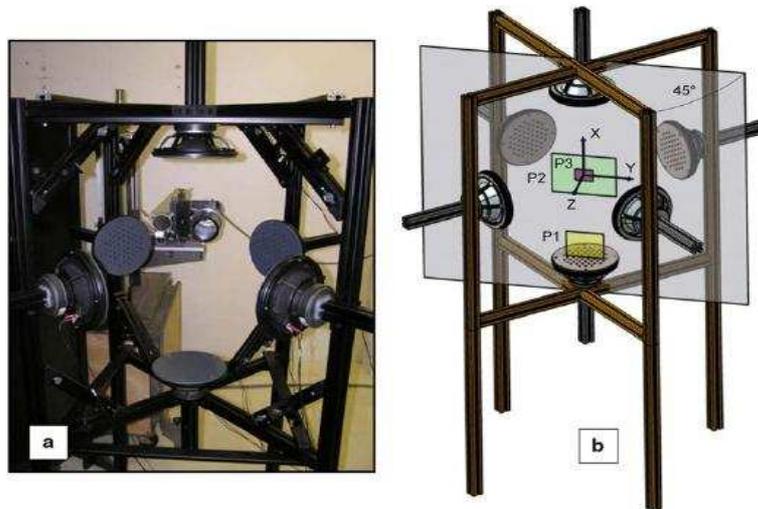


Figura 1.8: Arreglo experimental diseñado por Goepfert et al. (a) Cámara de turbulencia abierta, (b) Plano de medición [12]

A continuación se presentan los valores estadísticos representativos del flujo para algunos de los arreglos mencionados en esta sección (Tabla 1.1). Cabe mencionar que todos ellos presentan una quasi-isotropicidad al tener un radio isotrópico cercano a la unidad, valores de velocidad rms altos y velocidades medias despreciables.

Valores Estadísticos	Srdic et al.	Birouk et al.	Liu et al.	Hwang e Eaton	Goepfert et al.
$u_{1,RMS}$ [m/s]	0.0043	0.95	0.060	0.87	0.835
$u_{2,RMS}$ [m/s]	0.0042	1	0.051	0.84	0.877
$u_{1,RMS}/u_{2,RMS}$ [m/s]	1.03	0.95	1.2	1.03	0.95
U_1 [m/s]	0	0.1	0.043	0.019	0.033
U_2 [m/s]	-0.0004	-0.075	0.013	-0.088	-0.026
Re_λ	-	110	290	220	240
Medio	Agua	Aire	Agua	Aire	Aire
Tipo de arreglo	Rejillas	Cámara	Rejillas	Cámara	Cámara

Cuadro 1.1: Valores estadísticos de algunos arreglos experimentales de generación de turbulencia homogénea y quasi-isotrópica.

Capítulo 2

Arreglo Experimental

Para cumplir con el objetivo principal de este trabajo, se utilizó la cámara de generación de turbulencia homogénea quasi-isotrópica del Laboratorio de Reología (Instituto de Investigaciones en Materiales UNAM). En este capítulo se describirá dicho sistema, así como las modificaciones efectuadas para la realización del presente trabajo.

2.1. Generación del Flujo Turbulento

El sistema de generación de turbulencia empleado fue previamente diseñado y construido con el propósito de visualizar distintas etapas del proceso de emulsificación (Mancilla[22]), entre ellas la ruptura de filamentos viscosos. El arreglo consiste en una cámara similar a la de Hwang e Eaton[17], es decir, pertenece al grupo de sistemas de generación de turbulencia con decaimiento temporal.

De acuerdo a los resultados presentados por Mancilla[22], la cámara genera un flujo turbulento homogéneo y quasi-isotrópico al centro de la misma (en un área de 900 mm^2). Asimismo, se obtuvieron valores estadísticos comparables con los presentados en la literatura (ver Tabla 2.1). Sin embargo, dentro de las recomendaciones dadas por el autor, se realizaron algunas modificaciones al sistema. Éstas se llevaron a cabo en el presente trabajo, obteniendo resultados más favorables en cuanto a la homogeneidad e isotropía del flujo.

2.1.1. Cámara de turbulencia

La cámara consta de un contenedor cúbico de acrílico de $0.45 \times 0.45 \times 0.45 \text{ m}^3$, dentro del cual se tiene un arreglo simétrico de seis inyectores, constituidos por tuberías flexibles Loc-Line

Valores Estadísticos	Liu et al.	Hwang e Eaton	Goepfert et al.	Mancilla
$u_{1,RMS}$ [m/s]	0.060	0.87	0.835	0.767
$u_{2,RMS}$ [m/s]	0.051	0.84	0.877	0.744
$u_{1,RMS}/u_{2,RMS}$ [m/s]	1.2	1.03	0.95	1.031
U_1 [m/s]	0.043	0.019	0.033	0.220
U_2 [m/s]	0.013	-0.088	-0.026	0.543
Re_λ	290	220	240	123
Medio	Agua	Aire	Aire	Agua

Cuadro 2.1: Comparación de valores estadísticos de algunos arreglos experimentales de generación de turbulencia presentados en la literatura y el sistema empleado.

de 1.905 cm de diámetro interno. Éstos se colocaron en caras laterales opuestas de la cámara de manera que se tenían dos triángulos equiláteros opuestos tal y como se muestra en la Figura 2.1a. Una de las características más importantes de la cámara de generación de turbulencia empleada es la disposición de los inyectores, ya que la homogeneidad del flujo depende en gran medida de dicho arreglo. De esta manera, siguiendo las recomendaciones de Mancilla[22], se rotó 180° uno de los triángulos de inyectores para generar otro plano de simetría en el arreglo y, con esto, propiciar mayor homogeneidad en el flujo y un nivel de isotropía más alto (Figura 2.1b).

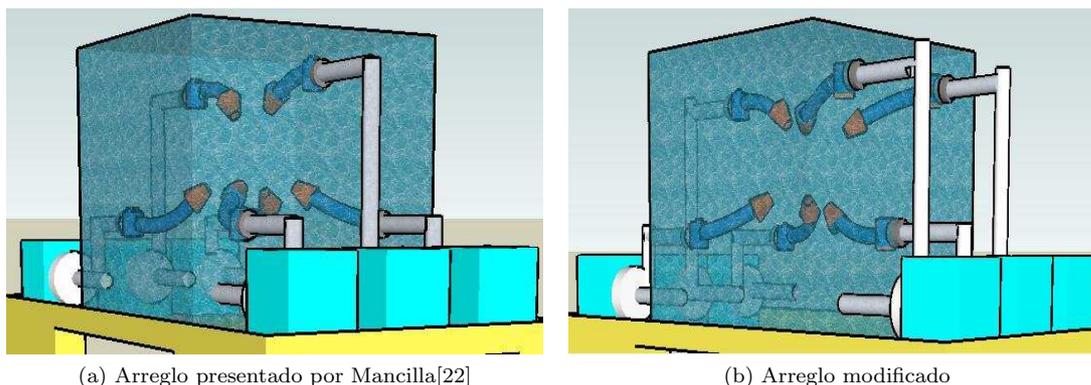


Figura 2.1: Modificación del arreglo experimental

En la Figura 2.2 se muestra un esquema de la cámara de turbulencia modificada. Además del arreglo de inyectores descrito, se cuenta con un banco de seis bombas (*Little Giant 3E-12N* de 1/15 hp), mediante las cuales se succiona fluido por la parte inferior de la cámara para posteriormente inyectarlo y formar seis chorros confocales en el centro de la misma.

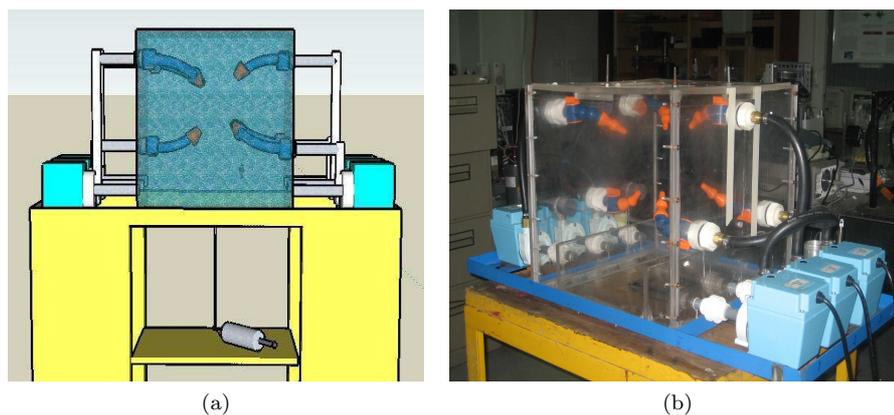


Figura 2.2: Arreglo experimental

La variación de la intensidad de turbulencia en este sistema se logra mediante la modificación del tamaño de las boquillas de los inyectores y la variación de la velocidad de inyección del fluido. En este trabajo se emplearon tres tamaños distintos de boquilla (0.635, 0.9525 y 1.27 cm). Con el objeto de que cada chorro estuviera completamente desarrollado en el punto de convergencia, cada inyector se colocó a una distancia de diez veces el diámetro de las boquillas más grandes. Esta distancia se mantuvo fija para los otros dos tamaños de boquillas.

Alineación de los inyectores

Otro factor importante en el nivel de isotropía alcanzado es la alineación de los inyectores. Debido a que éstos son tuberías flexibles, Mancilla[22] diseñó un dispositivo que permite posicionar a los inyectores de manera que los seis chorros converjan al mismo punto. En la Figura 2.3 se muestra este instrumento, el cual se fija en la parte inferior de la cámara para alinear los seis inyectores de acuerdo a los orificios del cubo. De este modo, pasando una varilla por la boquilla del inyector a través de los orificios correspondientes del cubo se logran alinear los seis chorros.

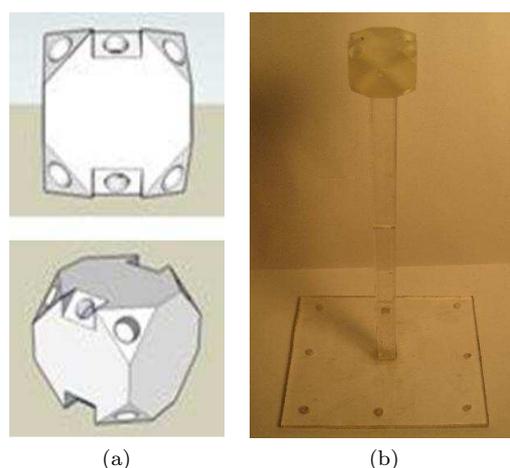


Figura 2.3: Instrumento para la alineación de los inyectores

2.1.2. Control electrónico de la velocidad de las bombas

En el trabajo presentado por Mancilla[22], las distribuciones de probabilidad de las velocidades instantáneas de los componentes de velocidad en el centro de la cámara son aproximadamente gaussianas. Una característica importante de dichas distribuciones es la presencia de “colas” largas al principio y al final. Esto se atribuyó al sistema de control de la velocidad de las bombas. Por esta razón, se decidió utilizar un control electrónico.

El sistema empleado en el trabajo anterior consistía de atenuadores (*dimmers*) comerciales, los cuales se adaptaron a las bombas para variar su velocidad manualmente. A pesar de que se logró tener un rango de velocidades adecuado, el control de la velocidad de inyección no era preciso. Por esta razón, se diseñó un nuevo sistema, el cual se basa en la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) y tiene la modalidad de usarse tanto manual como automáticamente por medio de la computadora. De este modo, el control se divide en dos partes principales: el PWM y la etapa de potencia. Una característica importante del sistema empleado es que cada motor se regula independientemente, es decir, se construyó un control electrónico para cada motor.

Modulación por ancho de pulso *PWM*

Se empleó la técnica de modulación por ancho de pulso, o PWM por sus siglas en inglés, para controlar la velocidad de giro de los motores de las bombas, y con ello la velocidad de inyección de fluido. La ventaja de este tipo de sistemas es que mantiene el par del motor constante y no implica

un desaprovechamiento de la energía eléctrica. De esta manera, se modificó el ciclo de trabajo de una señal sinusoidal para controlar la cantidad de energía enviada al motor.

El ciclo de trabajo de una señal periódica se puede definir como el ancho relativo de su parte positiva en relación con el periodo, lo cual se puede expresar matemáticamente como:

$$D = \tau T, \tag{2.1}$$

donde D es el ciclo de trabajo, τ es el ancho de pulso y T es el periodo de la función. Entonces, cuanto más tiempo esté la señal en estado alto, mayor será la velocidad del motor. Este tren de pulsos, en realidad, hace que el motor marche alimentado por la tensión máxima de la señal durante el tiempo en que ésta se encuentra en estado alto, y que pare en los tiempos en que la señal está en estado bajo.

Esta primera etapa del control se implementó con el circuito integrado TL494, el cual, básicamente, compara dos entradas y, como resultado, emite los pulsos a la salida. Una de las entradas es creada por el oscilador interno del circuito y tiene la forma de una onda de sierra, mientras que la otra es la señal moduladora. En la salida, la frecuencia es generalmente igual a la de la señal de diente de sierra y el ciclo de trabajo está en función de la portadora. De esta manera, mediante un potenciómetro de precisión se controla el ancho de los pulsos a la salida y, con esto, el ciclo de trabajo proporcionado al motor.

Por otro lado, mediante el pin *feedback* del circuito integrado, la generación analógica del tren de pulsos se activa o se desactiva, en el caso de que la velocidad de giro se desee controlar por medio de la computadora. Con este fin, se elaboró un programa en LabView (Apéndice I) que genera un tren de pulsos a partir del ingreso del ciclo de trabajo requerido, empleando el mismo para todas las bombas. El ciclo de trabajo es la relación de tiempos entre el estado alto y bajo de la señal empleada y se expresa como un porcentaje entre el periodo y el ancho del pulso. De manera que cuando el ciclo de trabajo es cercano al 100%, el motor gira a una velocidad cercana a la máxima. En este caso, cuando el ciclo de trabajo era menor al 70%, los motores de las bombas no giraban. Esto debido a que el voltaje proporcionado no era suficiente para succionar agua e inyectarla. La información digital generada por el programa se transmitió a través del puerto paralelo hacia el circuito integrado para desactivarlo y transmitir el tren de pulsos al resto del sistema.

Etapas de potencia

El tren de pulsos generado, ya sea manualmente o a través del programa de LabView, se transmitió a la etapa de potencia mediante un optoacoplador. Este dispositivo, también empleado para la transmisión de información del puerto paralelo hacia el TL494, se utilizó para proteger a la computadora y separar las etapas del sistema de control. También denominado como optoaislador, es un dispositivo que cumple la función de interruptor. La ventaja es que funciona mediante la emisión y recepción de luz, por lo que existe un aislamiento eléctrico entre los circuitos de entrada y salida del dispositivo.

Además, esta etapa está constituida por ocho MOSFETs (por cada bomba). La ventaja de haber utilizado este tipo de transistores es que la velocidad de conmutación es muy alta, por lo que el control de la velocidad de giro de los motores resulta preciso. Asimismo, se utilizaron ocho FETs -cuatro para controlar el lóbulo negativo de la onda sinusoidal y cuatro para el positivo- para evitar el sobrecalentamiento de los transistores.

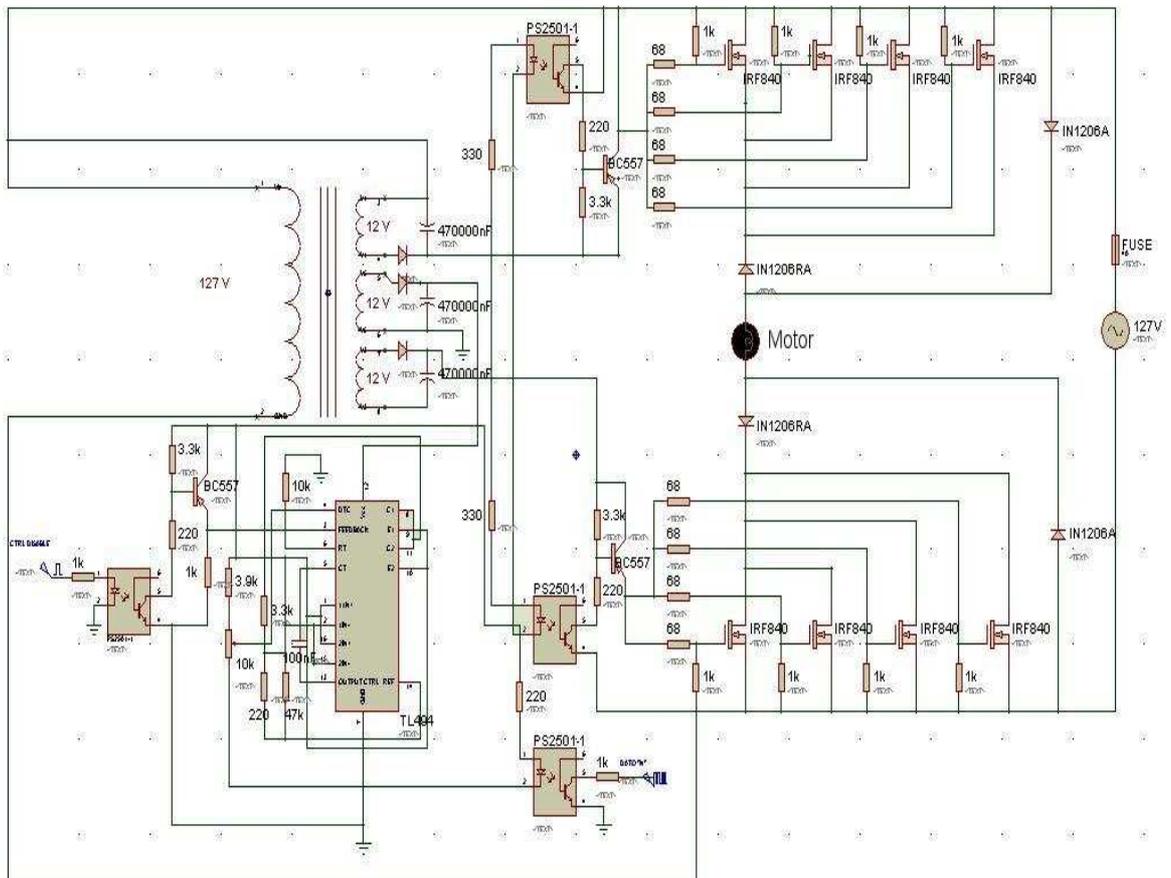


Figura 2.4: Diagrama electrónico del controlador diseñado para cada bomba de la cámara de turbulencia.

2.2. Sistema de inyección de fluido viscoso

Como se puede observar en la Figura 2.5, la cámara de generación de turbulencia tiene un orificio en la parte inferior, al centro de la misma. En éste se encuentra acoplado un pistón mediante el cual se inyecta el fluido viscoso a través de un capilar de 27 mm de diámetro. De esta manera, se inyecta el fluido viscoso manualmente a una velocidad muy pequeña, de manera que el filamento generado no se rompa ni se deforme. Asimismo, el pistón se encuentra fijo a la cámara, de manera que el filamento únicamente se desplaza verticalmente.

Es importante señalar que la velocidad de inyección del filamento no fue cuantificada debido a que no tiene ninguna ingerencia en el desarrollo del experimento. Debido a que las relaciones de viscosidades que fueron manejadas en este trabajo (detalladas en la siguiente sección) son muy pequeñas, el filamento de fluido viscoso lograba estabilizarse y alcanzar una velocidad de desplazamiento nula. Una vez alcanzado este estado se comenzaban los experimentos al activar todas las bombas simultáneamente, creando un volumen de flujo turbulento homogéneo (en cuyo centro se encontraba un filamento largo de fluido viscoso).

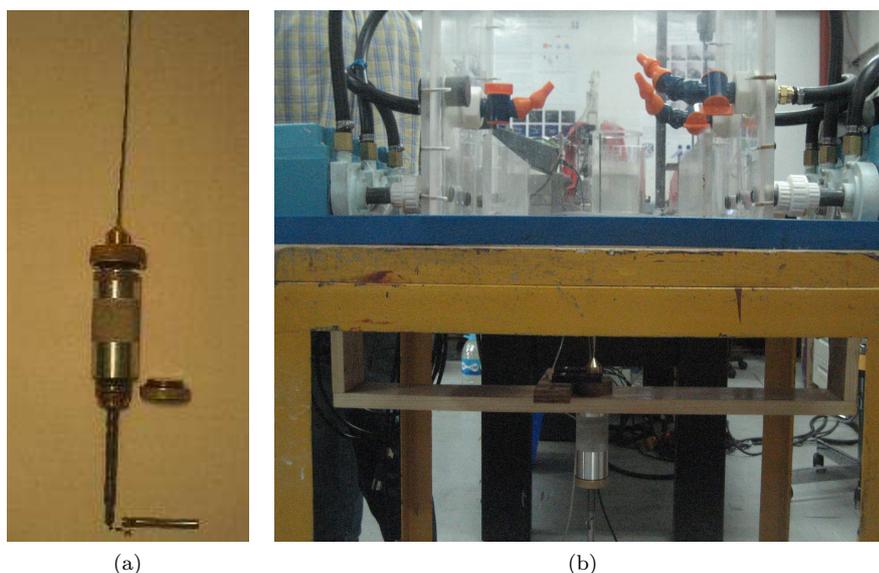


Figura 2.5: Sistema de inyección de fluido viscoso

2.3. Parámetros experimentales

2.3.1. Fluidos utilizados

Los fluidos utilizados en este trabajo fueron agua y aceite de silicón de distintas viscosidades. La relación de viscosidades para todos los casos fue tal que el fenómeno de la ruptura del filamento de fluido viscoso fuera apreciable mediante las técnicas de visualización empleadas. Las propiedades físicas de los fluidos empleados se presentan en la Tabla 2.2. Los aceites de silicón empleados fueron

Fluido	Agua	Aceite de silicón	Aceite de silicón
Densidad [kg/m^3]	1000	976	974
Viscosidad [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	1×10^{-3}	30	10
Tensión superficial [N/m]	72.8×10^{-3}	21.5×10^{-3}	21.5×10^{-3}

Cuadro 2.2: Propiedades físicas de los fluidos utilizados a temperatura ambiente

polidimetilsiloxano (marca *GELEST* clasificación *DMS-T43* y *DMS-T41*), los cuales fueron teñidos de rojo con colorante (*Sudan Red*) para su visualización. Cabe mencionar que de acuerdo al trabajo presentado por Hernández[15], la viscosidad del aceite permanece constante para un rango amplio de rapidez de deformación (rango de trabajo); sin embargo, a altas velocidades de deformación este fluido presenta adelgazamiento y elasticidad.

2.3.2. Velocidades de inyección

De acuerdo a lo presentado en este capítulo, se varió la velocidad de inyección de agua al centro de la cámara de turbulencia cambiando tanto el tamaño de las boquillas de los inyectores como el periodo de trabajo de los motores de las bombas mediante el control electrónico. A continuación se presentan las velocidades de inyección con las cuales se realizaron los experimentos. Éstas se eligieron en base al porcentaje del ciclo de trabajo introducido al programa de LabView.

Diámetro de boquilla \emptyset	Porcentaje de ciclo de trabajo de las bombas				
	100 %	98 %	96 %	94 %	92 %
6.35 mm	7.65	3.29	2.56	2.37	2.31
9.525 mm	4.29	1.97	1.79	1.73	1.65
12.7 mm	3.54	2.32	1.66	1.49	1.36

Cuadro 2.3: Velocidades de los chorros de agua utilizadas en m/s

Capítulo 3

Métodos de visualización de flujo

Se emplearon dos técnicas de visualización de flujo en este trabajo. La primera, velocimetría por imágenes de partículas (PIV), fue empleada para medir el campo de velocidades al centro de la cámara de generación de turbulencia. Asimismo, se empleó una cámara de alta velocidad para visualizar el proceso de ruptura del filamento viscoso en el medio turbulento.

3.1. Velocimetría por imágenes de partículas (PIV)

Este método permite no solamente la visualización del flujo en estudio, sino también su caracterización cuantitativa, pues proporciona mediciones instantáneas del campo de velocidades en un plano. A diferencia de técnicas como la velocimetría de láser Doppler o la anemometría con hilo caliente, la velocimetría por imágenes de partículas produce campos vectoriales bidimensionales, mientras que los otros métodos miden la velocidad del fluido de manera puntual. Esto se lleva a cabo mediante la medición del desplazamiento de partículas trazadoras previamente disueltas en el fluido. La concentración de partículas en el fluido es tal que es posible distinguirlas individualmente; sin embargo, no es práctico seguirlas de una fotografía a la otra. Entonces, la medición de la velocidad de grupos de partículas se lleva a cabo mediante la determinación del desplazamiento -determinado mediante técnicas de correlación cruzada- y el tiempo entre fotografías.

El sistema PIV empleado consiste de una cámara CCD (*Kodak MegaPlus ES1.0 / Type 16 (30 Hz)*), un láser de alta potencia con un sistema óptico asociado para convertir el haz emitido en una hoja delgada para iluminar un plano (*New Wave Solo, HiSense Dynamics*), un sincronizador -el cual actúa como un *trigger* para controlar a la cámara y al láser, partículas trazadoras para dopar el fluido en estudio (*Dantec Dynamics 80A7001 S-HGS-10*), una computadora y el *software* de adquisición y procesamiento de imágenes (*Flow Manager*).

Las manera en que se realizan mediciones con este equipo se describe a continuación. Esta información se encuentra resumida en la Figura 3.1.

1. El fluido es dopado con partículas trazadoras, cuya función es seguir el movimiento del fluido y, de esta manera, determinar el campo de velocidades del plano iluminado. Las partículas utilizadas fueron esferas de vidrio huecas recubiertas con plata de 10 [μm] de diámetro.
2. El plano de interés es iluminado con una hoja láser pulsante. De este modo, las partículas trazadoras reflejan la luz y es posible determinar su desplazamiento.

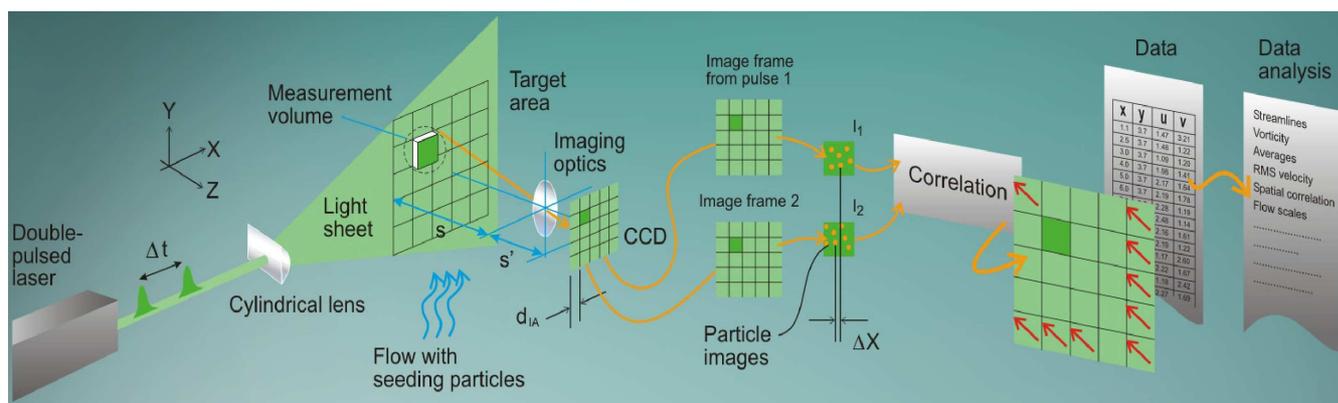


Figura 3.1: Configuración y funcionamiento de un sistema PIV (© www.dantecmt.com)

3. Mediante el *software Flow Manager*, se fija el tiempo entre fotografías, así como el área de interrogación, y se sincronizan el láser y la cámara para la captura de imágenes.
4. Las imágenes son analizadas mediante la fragmentación de cada una de estas en pequeñas áreas de interrogación. Como resultado, se calcula un vector de velocidad por cada área.
5. Los resultados obtenidos son filtrados y validados para remover vectores erróneos y se obtiene un solo mapa vectorial estadístico.

El procedimiento anterior está englobado por cuatro factores principales: iluminación y sembrado de partículas, captura, procesamiento y post-procesamiento de las imágenes. Estas se describirán brevemente a continuación. Asimismo se presenta una tabla con los parámetros utilizados en este trabajo (Tabla 3.1).

3.1.1. Iluminación y sembrado de partículas

El sembrado de partículas es un factor importante ya que éstas son las encargadas de seguir la dinámica del fluido. El tipo y tamaño de las partículas depende de la intensidad luminosa que se tenga y del tipo de fluido que se requiera estudiar. De esta manera, para los líquidos, generalmente, se utilizan partículas de poliestireno, poliamida o esferas huecas de vidrio. Su diámetro va desde 10 hasta 100 μm . Por el otro lado, para los gases se utilizan gotas de aceite de 1 a 5 μm de diámetro. En general es posible utilizar cualquier partícula siempre y cuando disperse la luz adecuadamente para su captura mediante la cámara. La concentración de partículas en el fluido es de gran importancia, ya que de esto depende que se tenga una buena correlación para determinar el campo de velocidades. Ésta debe estar balanceada con el tamaño de partícula que se tenga, de manera que se disperse suficiente luz para la visualización del flujo. En general, de diez a veinticinco partículas deben aparecer en cada área de interrogación para que la correlación de imágenes de un resultado correcto.

Una vez que se haya sembrado el fluido, se deben establecer varios factores referentes a la iluminación. El más importante es el tiempo entre pulsos, Δt . Este depende de la naturaleza del flujo y determina las velocidades máximas y mínimas que se deseen medir. En este caso, este factor se redujo de manera considerable, teniendo tiempos de 5 μs hasta 15 μs . Lo anterior debido a las altas intensidades turbulentas producidas, lo cual provoca que las partículas salgan rápidamente del área de interrogación para tiempos más largos. Por otro lado, el generador de secuencias y el

programador de tiempo tienen como función sincronizar la emisión de la hoja láser y la captura de imágenes de manera pulsátil de acuerdo al tiempo entre pulsos establecido.

3.1.2. Adquisición de imágenes

Un punto importante de las mediciones con esta técnica es que la cámara debe estar posicionada a un ángulo recto del plano de luz emitido por el láser. La cámara con la que se capturaron las imágenes cuenta con un chip CCD, el cual permite capturar dos imágenes con un periodo de tiempo muy corto entre ellas (del orden de μs). Dependiendo de la resolución espacial requerida y de la naturaleza del flujo, la adquisición de imágenes se puede realizar mediante el método *single frame/double exposure* o el *double frame/single exposure*. En el primer método, los pares de imágenes tomados son capturados en el mismo cuadro; mientras que con el segundo método se tiene un cuadro por imagen. En este trabajo, debido a que las partículas de fluido se desplazan rápidamente en un corto periodo de tiempo, se decidió trabajar con el *double frame/single exposure*. Como resultado se tuvo cada imagen en distintos cuadros para, posteriormente, efectuar una correlación cruzada.

3.1.3. Procesamiento de imágenes

Dependiendo del número de imágenes requeridas, se van tomando pares de imágenes, las cuales son divididas en lo que se conoce como *áreas de interrogación*. Estas deben ser previamente definidas y generalmente son de 32x32 píxeles. Una vez adquiridas las imágenes, cada área de interrogación de la primera foto se correlaciona con el área equivalente de la segunda foto de esa área. Como resultado de la correlación se obtiene un desplazamiento promedio de las partículas. La velocidad promedio es calculada con esta variable y con el tiempo entre pulsos. Posteriormente, se correlacionan todas las áreas de interrogación entre pares de imágenes para obtener el mapa vectorial de toda la imagen.

3.1.4. Post-procesamiento de imágenes

El análisis de las imágenes es de carácter estadístico y a pesar de que se tiene un nivel de precisión alto en el cálculo de los desplazamientos de las partículas, es común que se obtengan vectores erróneos. Esto se debe comúnmente a una concentración errónea de partículas, variaciones en la iluminación, visibilidad, entre otros factores. Mediante el post-procesamiento de los campos vectoriales adquiridos, es posible filtrar y validar dichos vectores. Existen distintas técnicas para identificar y rechazar vectores que estén fuera de rango para, posteriormente, sustituirlos mediante la interpolación de los vectores cercanos a éstos. En este trabajo se empleó una secuencia de validación, en la cual primero se efectuó una validación de picos y, posteriormente, una validación del campo completo.

Parámetros del procesamiento de imágenes	
Δt	5 - 20 μs
Duración de cada pulso	0.01 μs
Número de imágenes por medición	500px
Parámetros del post-procesamiento de imágenes	
Secuencia Adaptativa: Su función es realizar la correlación cruzada.	
Área de interrogación	32x32 pixeles
Traslape	50 % - 50 %
Promedio: Se validan y sustituyen vectores comparándolos con los vectores vecinos.	
Área	3x3 pixeles
Iteraciones	3
Filtrado: Se sustituye cada vector por su promedio en un área específica.	
Área	3x3 pixeles

Cuadro 3.1: Parámetros utilizados en la toma de mediciones con PIV

3.2. Cámara de alta velocidad

La ruptura de filamentos viscosos que ocurre durante la formación de emulsiones en regímenes turbulentos se lleva a cabo en escalas de tiempo incapaces de ser detectadas por cámaras convencionales. Para poder visualizar el proceso de ruptura se emplearon dos cámaras de alta velocidad. Para las series con boquillas de 0.635 cm y 0.9525 cm se empleó una cámara *Redlake*, modelo *Motion Scope PCI8000s*. Las grabaciones con esta cámara se llevaron a cabo a 1000 fps con una resolución de 240x210 pixeles. Por otro lado, para las series con boquillas de 1.27 cm se utilizó la cámara *Motion Pro X4*. Las grabaciones con esta cámara se realizaron a 4000 fps con una resolución de 512 \times 512 pixeles. El plano de visualización fue el mismo para todas las visualizaciones y toma de mediciones con el PIV (Figura 3.2).

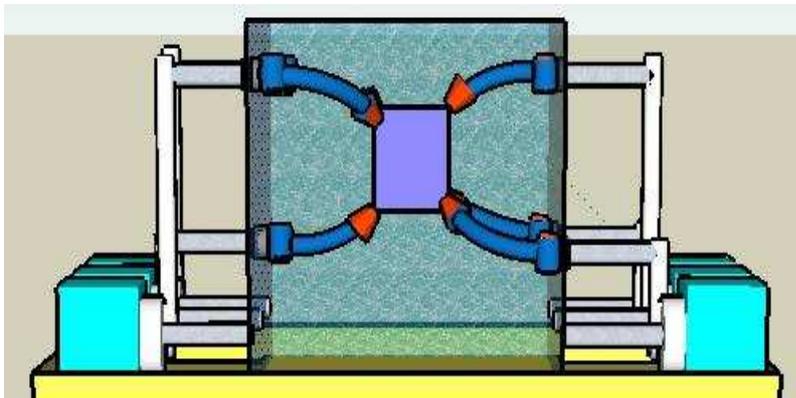


Figura 3.2: Plano de visualización.

Capítulo 4

Resultados

Con el objetivo de visualizar el caracter aleatorio del flujo turbulento, en el que se inyectarían los filamentos viscosos, se realizaron dos series de visualizaciones en el plano de estudio. Ambas se llevaron a cabo con una cámara de alta resolución, utilizando burbujas de aire y una pequeña concentración de partículas trazadoras. La primera serie se realizó proyectando una hoja láser por un costado de la cámara (Figura 4.1a). Mientras que para la segunda se iluminó el plano con un reflector colocado en la parte posterior del plano de estudio (Figura 4.1b). En ambas imágenes es imposible detectar un flujo preferencial, lo cual indica la homogeneidad del flujo.

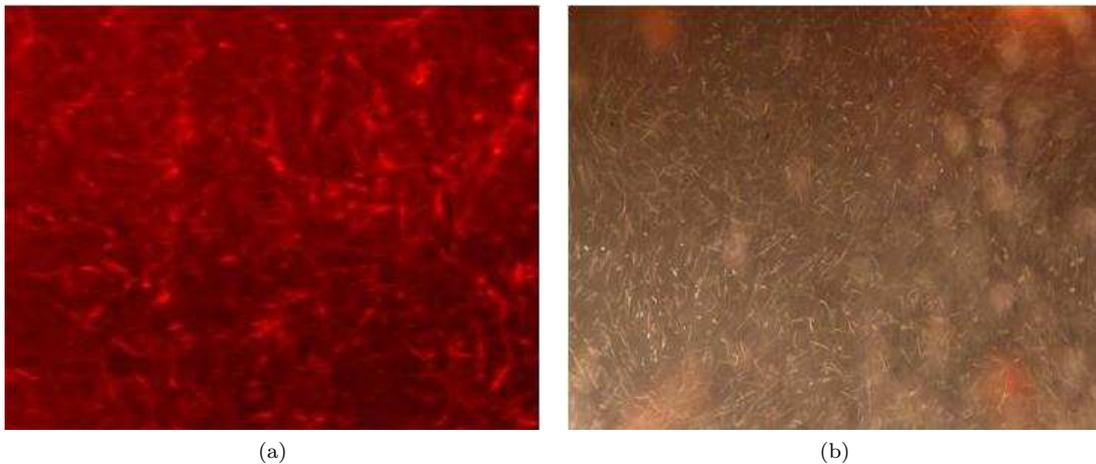


Figura 4.1: Flujo turbulento quasi-isotrópico: (a) Iluminado mediante una hoja láser; (b) Iluminado mediante un reflector

4.1. Caracterización del flujo turbulento

Mancilla[22] demostró que es posible producir turbulencia homogénea quasi-isotrópica con valores pequeños de la velocidad media. Asimismo, caracterizó el flujo y presentó los mapas vectoriales adquiridos de las mediciones efectuadas con el PIV. En esta tesis se llevaron a cabo ciertas modificaciones a dicho sistema, por lo que fue necesario volver a caracterizar el flujo. Esto se llevó a cabo mediante la descripción estadística de la turbulencia, el cálculo de las escalas turbulentas y de la tasa de disipación de energía cinética empleando un análisis dimensional [17].

Con este fin, se obtuvieron mapas vectoriales del flujo al centro de la cámara de turbulencia con el PIV, tal y como fue descrito en el capítulo anterior. Éstos fueron analizados y se comprobó nuevamente la isotropía en el plano de medición, mediante el cálculo de los parámetros estadísticos presentados en la Tabla 4.1.

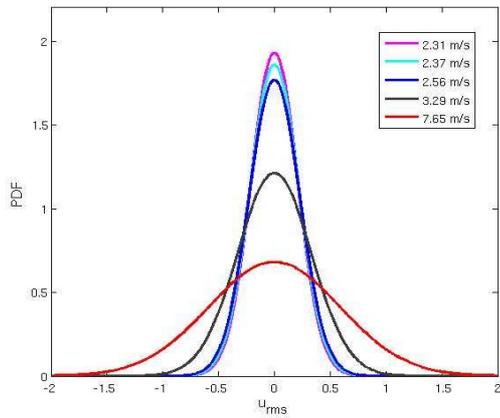
\emptyset (mm)	Vel. iny. (m/s)	U (m/s)	V (m/s)	u_{rms} (m/s)	v_{rms} (m/s)	u'/v'	Su'	Sv'	Ku'	Kv'
6.35	7.65	-0.23	0.05	0.59	0.69	0.85	-0.19	-0.51	4.19	4.64
	3.29	0.04	-0.07	0.33	0.30	1.08	0.03	-0.11	2.21	2.42
	2.56	-0.01	0.02	0.22	0.23	0.96	-0.14	-0.05	2.39	2.43
	2.37	-0.003	0.01	0.21	0.22	0.99	-0.16	-0.02	2.47	2.47
	2.31	0.003	0.02	0.21	0.21	0.99	-0.17	-0.03	2.48	2.51
9.525	4.63	0.12	0.27	0.52	0.52	1	0.51	1.05	3.26	4.04
	2.53	0.01	-0.02	0.36	0.34	1.06	0.24	1.36	2.62	5.17
	1.95	0.05	0.08	0.27	0.26	1.06	0.22	1.47	2.95	5.03
	1.87	0.07	0.08	0.26	0.24	1.05	0.3	1.5	3.11	5.12
	1.81	0.07	0.07	0.24	0.23	1.04	0.35	1.53	3.33	5.28
12.7	3.54	-0.09	0.02	0.44	0.50	0.89	-0.27	-0.31	2.49	2.53
	2.32	-0.03	-0.01	0.25	0.27	0.92	-0.21	-0.17	2.76	2.45
	1.66	-0.07	0.01	0.21	0.25	0.84	-0.10	-0.09	2.84	2.39
	1.49	-0.08	0.01	0.20	0.24	0.82	-0.09	-0.12	2.67	2.35
	1.36	-0.08	0.01	0.19	0.23	0.83	-0.11	-0.06	2.74	2.36

Cuadro 4.1: Valores estadísticos de los mapas de velocidad adquiridos mediante PIV

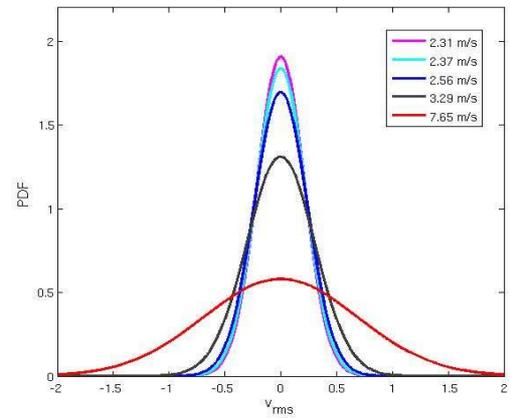
Al igual que en el trabajo anterior, se registraron velocidades medias casi nulas en la mayoría de los casos y un aumento de la intensidad turbulenta al aumentar la velocidad de inyección. Por otro lado, se comprobó el caracter isotrópico del flujo mediante el cálculo de la razón isotrópica (u'/v') y el cuarto y quinto momentos centrales, la curtosis (K) y la asimetría (S). Para todos los casos estudiados, la razón isotrópica es cercana a la unidad, la curtosis a tres y la asimetría a cero. Estos valores corresponden a los de una distribución gaussiana o normal, lo cual se puede observar en las funciones de densidad de probabilidad (PDF) calculadas (Figura 4.2).

Las velocidades correspondientes al 98 % del ciclo de trabajo de las bombas son las más cercanas a una distribución gaussiana para todos los diámetros de boquilla. Asimismo, únicamente la velocidad correspondiente a un 100 % del ciclo de trabajo presenta una mayor dispersión de la velocidad, en comparación con las otras velocidades. Esto es debido a que la velocidad más alta no se produjo mediante la regulación de pulsos con el control electrónico, sino que se tomó la velocidad de las bombas al ser conectadas directamente a la corriente eléctrica. Con esto se comprueba que mediante el empleo del control elaborado, se producen velocidades de inyección reguladas. A diferencia del trabajo anterior, se obtuvo un menor factor de asimetría para los casos estudiados. Esto se debió a la reducción de las velocidades medias mediante una mejor alineación de los chorros y un control más preciso de las velocidades de inyección.

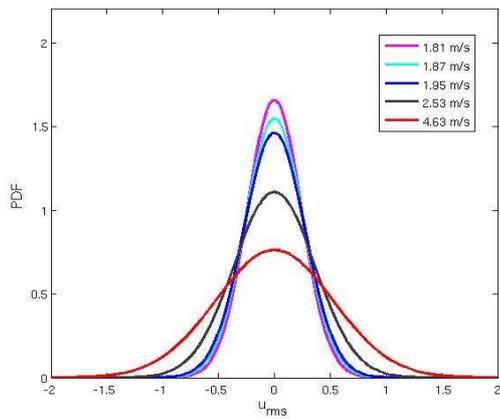
Los mapas escalares de la razón isotrópica se muestran en la Figuras 4.3 - 4.5, de acuerdo al diámetro de boquilla, para las distintas velocidades de inyección. Al centro del plano de estudio -lugar donde el filamento de fluido viscoso es inyectado- se tiene una razón isotrópica de aproximadamente uno. A mayor distancia del centro la razón isotrópica diverge de la unidad. Esto indica que al centro se tiene un flujo turbulento isotrópico y, a medida que aumenta la distancia respecto al centro, la turbulencia comienza a decaer y el caracter isotrópico en las grandes escalas se pierde.



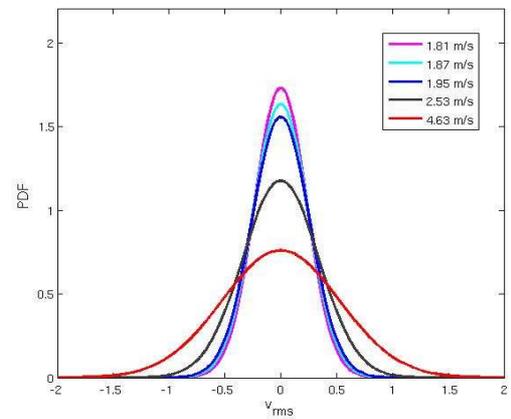
(a) PDF de la u_{rms} ($\phi = 6.35mm$)



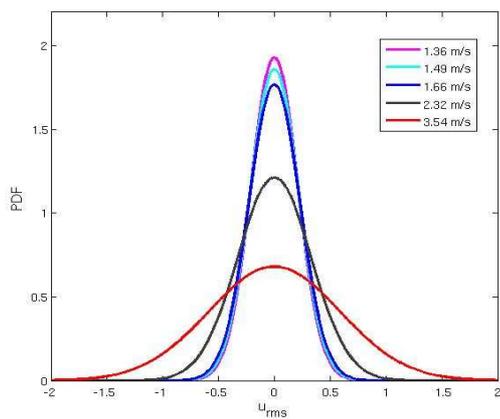
(b) PDF de la v_{rms} ($\phi = 6.35mm$)



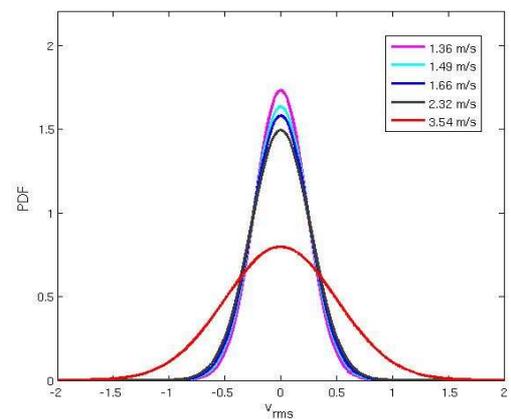
(c) PDF de la u_{rms} ($\phi = 9.525mm$)



(d) PDF de la v_{rms} ($\phi = 9.525mm$)

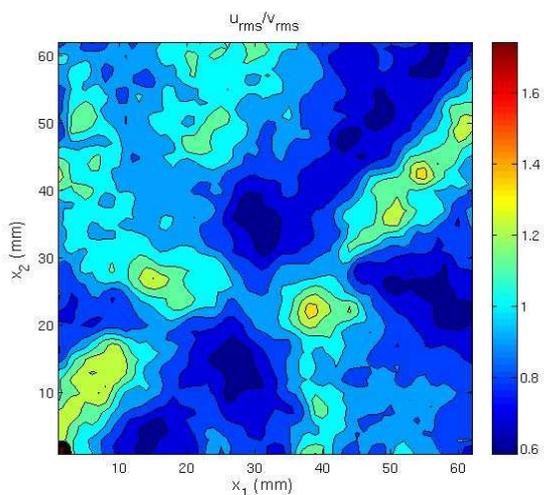


(e) PDF de la u_{rms} ($\phi = 12.70mm$)

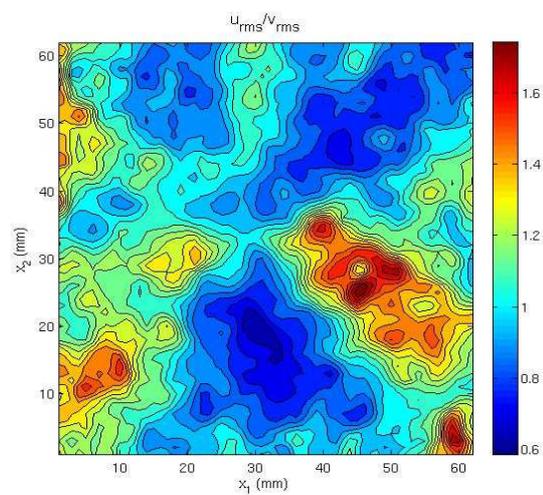


(f) PDF de la v_{rms} ($\phi = 12.70mm$)

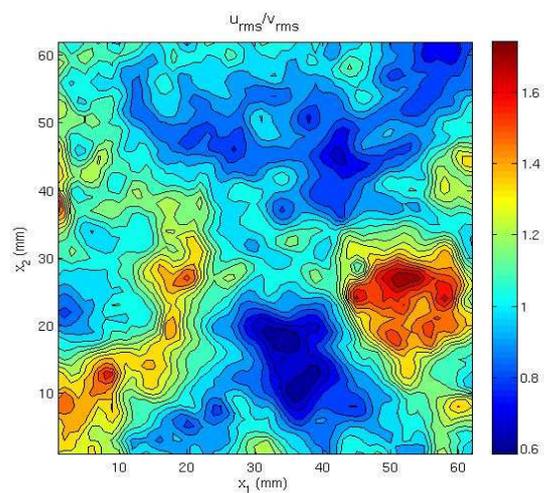
Figura 4.2: Funciones de densidad de probabilidad de las velocidades u_{rms} y v_{rms} para cada diámetro y velocidad de inyección.



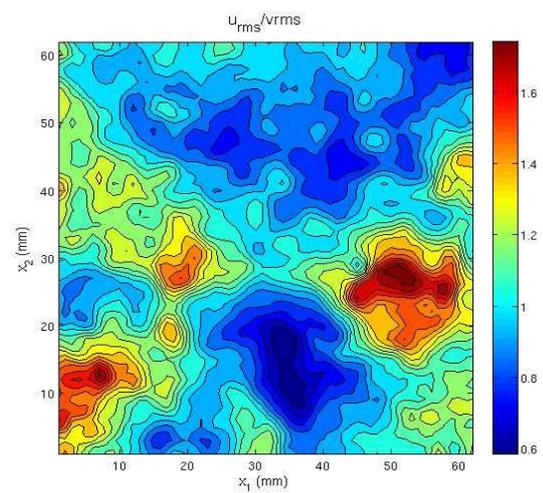
(a) RI para una velocidad de inyección de 7.65 m/s



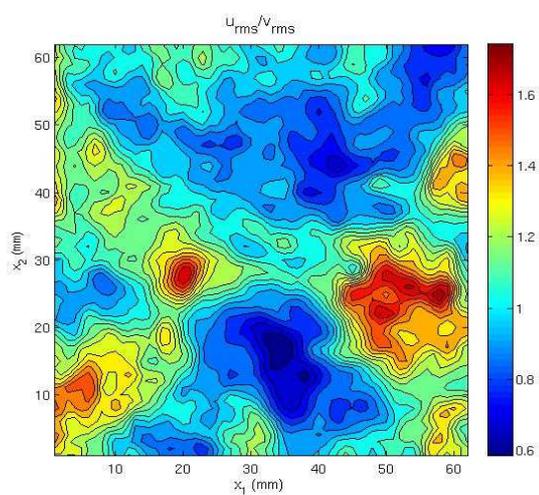
(b) RI para una velocidad de inyección de 3.29 m/s



(c) RI para una velocidad de inyección de 2.56 m/s

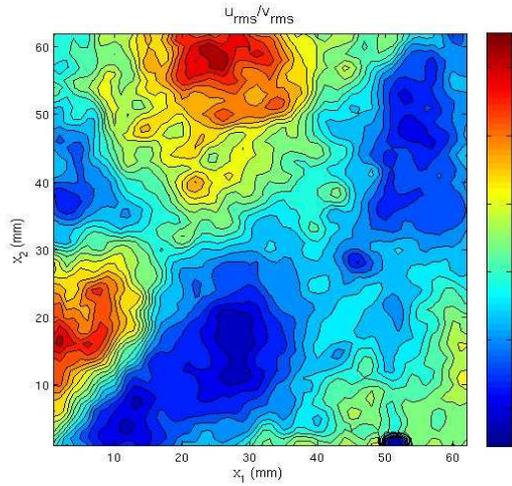


(d) RI para una velocidad de inyección de 2.37 m/s

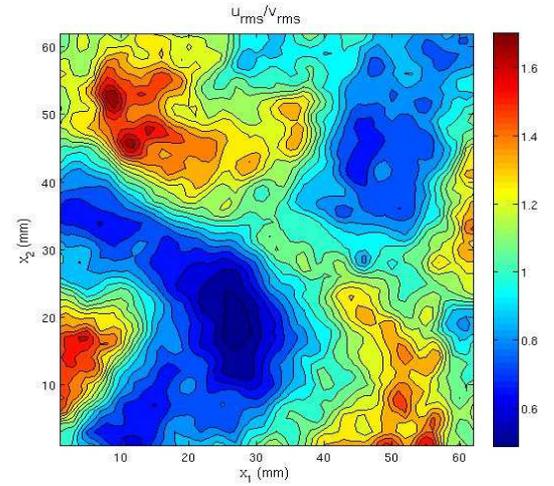


(e) RI para una velocidad de inyección de 2.31 m/s

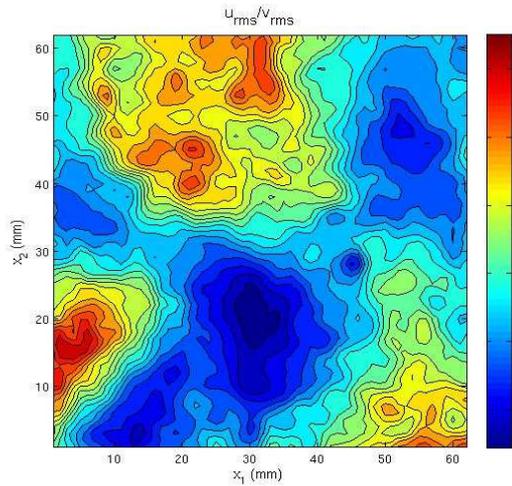
Figura 4.3: Mapas escalares de las razones isotrópicas para las boquillas de 6.35 mm de diámetro.



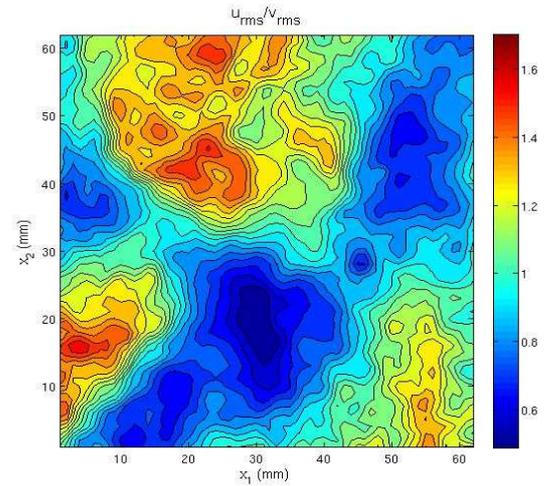
(a) RI para una velocidad de inyección de 4.63 m/s



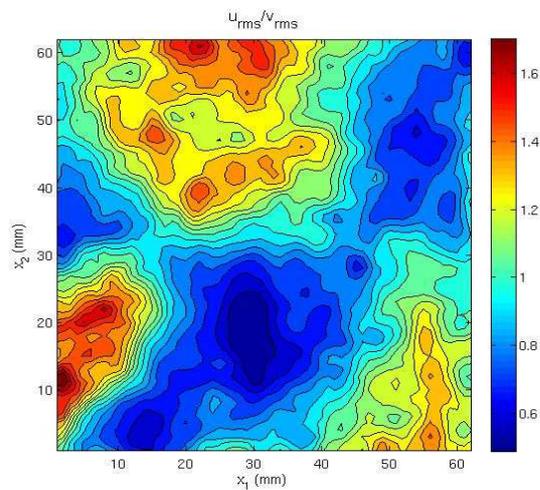
(b) RI para una velocidad de inyección de 2.53 m/s



(c) RI para una velocidad de inyección de 1.95 m/s

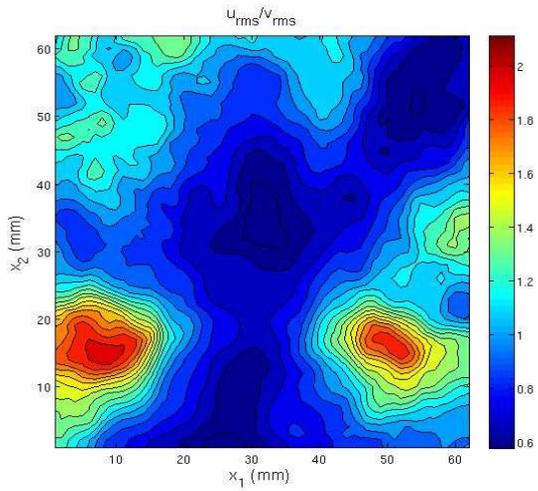


(d) RI para una velocidad de inyección de 1.87 m/s

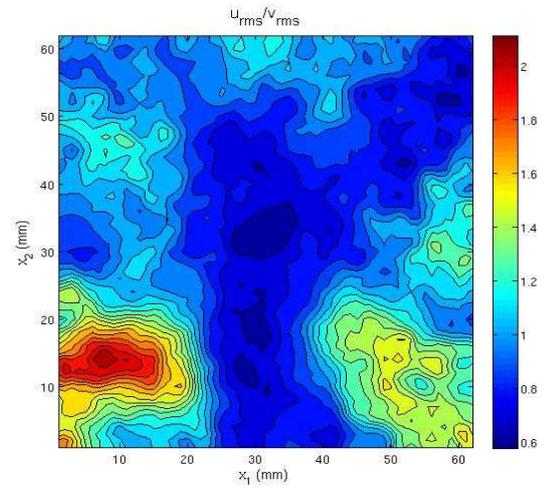


(e) RI para una velocidad de inyección de 1.81 m/s

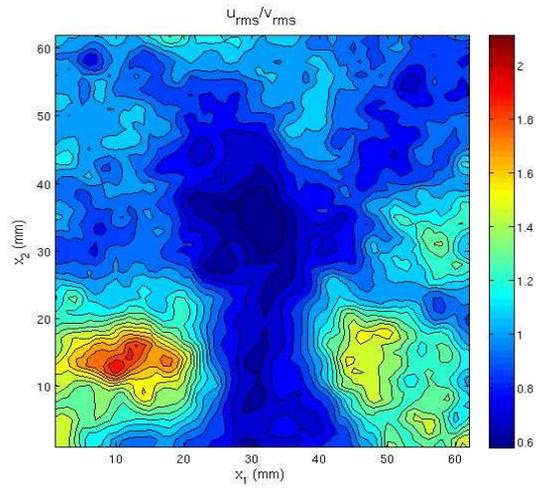
Figura 4.4: Mapas escalares de las razones isotrópicas para las boquillas de 9.525 mm de diámetro.



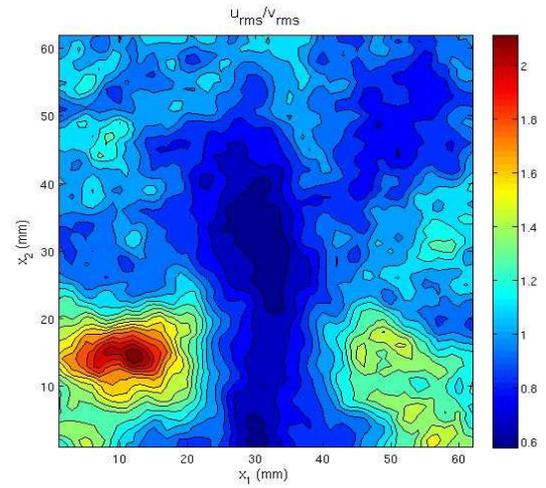
(a) RI para una velocidad de inyección de 3.54 m/s



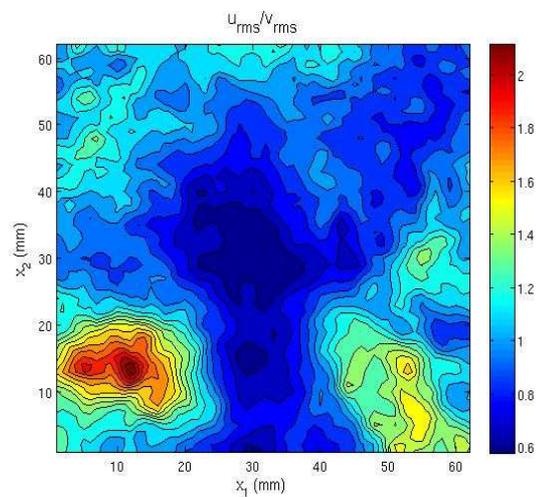
(b) RI para una velocidad de inyección de 2.32 m/s



(c) RI para una velocidad de inyección de 1.66 m/s



(d) RI para una velocidad de inyección de 1.49 m/s



(e) RI para una velocidad de inyección de 1.36 m/s

Figura 4.5: Mapas escalares de las razones isotrópicas para las boquillas de 12.70 mm de diámetro.

Una parte importante de la caracterización de un flujo turbulento es la determinación de las escalas espaciales y temporales, lo cual depende directamente del cálculo de la tasa de disipación de energía del flujo. Esta, al igual que en el trabajo de Mancilla[22], se calculó siguiendo el método propuesto por Kolmogorov denominado análisis dimensional [16]. Partiendo de la hipótesis de la existencia de una isotropía local, la tasa de disipación es:

$$\varepsilon = 2\nu s'_{ij} s'_{ij} = 15\nu \left(\frac{\partial u'_1}{\partial x_1} \right)^2 \quad (4.1)$$

con

$$s'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right), \quad (4.2)$$

donde ν es la viscosidad cinemática del agua y s'_{ij} es la rapidez de deformación fluctuante.

De este modo, partiendo de la definición de la escala de Taylor (λ) y haciendo uso de una velocidad representativa (\mathbf{u}), es posible expresar la tasa de disipación en términos de dichas microescalas y de las velocidades fluctuantes:

$$\left(\frac{\partial u'_1}{\partial x_1} \right)^2 \equiv \frac{\mathbf{u}^2}{\lambda^2} = \frac{u_1'^2}{\lambda^2}; \quad (4.3)$$

donde:

$$\mathbf{u}^2 = \frac{1}{3} u'_i u'_i \quad (4.4)$$

Es posible igualar \mathbf{u}^2 con $u_1'^2$ si el flujo es isotrópico ($u_1'^2 = u_2'^2 = u_3'^2$). Sustituyendo la Ecuación (4.3) en la Ecuación (4.1), la tasa de disipación de energía queda expresada de la siguiente manera:

$$\varepsilon = 15\nu \frac{u_1'^2}{\lambda^2} \quad (4.5)$$

Alternativamente, relacionando la escala de Taylor con la escala integral (l) mediante la metodología de Lumley et al. [32] la tasa de disipación se puede calcular a partir de la escala integral:

$$\frac{\mathbf{u}^3}{l} = 15\nu \frac{\mathbf{u}^2}{\lambda^2} \quad \therefore \quad \varepsilon = \frac{u_1'^3}{l} \quad (4.6)$$

Otro parámetro importante en la caracterización de un flujo turbulento es la energía de disipación. Debido a que el flujo en este caso es isotrópico, es posible implementar la definición de energía cinética propuesta por Eaton et al. [17], utilizando las componentes de velocidad u'_1 y u'_2 obtenidas con el PIV.

$$q^2 \equiv u'_i u'_i \cong 3 \left(\frac{u_1'^2 + u_2'^2}{2} \right) = 3\mathbf{u}^2 \quad (4.7)$$

De esta manera, la tasa de disipación queda expresada únicamente en términos de la energía cinética turbulenta y la escala integral, la cual fue tomada como el diámetro de las boquillas.

$$\varepsilon = \frac{(q^2/3)^{3/2}}{l} \quad (4.8)$$

Las escalas espaciales y temporales de Taylor y Kolmogorov se calcularon a partir de los valores de las tasas de disipación obtenidos, mediante las siguientes expresiones:

$$\lambda \cong \left(\frac{5\nu q^2}{\varepsilon} \right)^{1/2}, \quad Re_\lambda \cong \frac{\lambda(q^2/3)^{1/2}}{\nu} \quad (4.9)$$

$$\tau \cong \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2}, \quad v = (\nu\varepsilon)^{1/4}, \quad L_k = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (4.10)$$

\emptyset (mm)	Vel. iny. (m/s)	$q^2(m^2/s^2)$	$\varepsilon(m^2/s^2)$	$\lambda(\mu m)$	Re_λ	$L_k(mm)$	$\tau(ms)$	v (m/s)
6.35	7.65	0.91	26.31	0.4	250.51	0.01	0.2	0.07
	3.29	0.33	5.79	0.5	194.65	0.02	0.4	0.05
	2.56	0.21	2.92	0.5	173.67	0.02	0.5	0.04
	2.36	0.18	2.39	0.6	167.96	0.02	0.6	0.04
	2.31	0.16	2.03	0.6	163.47	0.02	0.6	0.04
9.525	4.63	0.88	16.57	0.5	303.92	0.01	0.2	0.06
	2.53	0.25	2.54	0.6	222.31	0.02	0.6	0.04
	1.94	0.18	1.49	0.7	203.45	0.02	0.7	0.03
	1.87	0.15	1.18	0.7	195.55	0.03	0.8	0.03
	1.81	0.14	1.02	0.7	191.07	0.03	0.9	0.03
12.70	3.54	0.47	4.94	0.6	300.92	0.02	0.4	0.04
	2.32	0.16	1	0.8	230.52	0.03	0.9	0.03
	1.66	0.13	0.70	0.9	217.41	0.03	1.1	0.03
	1.49	0.12	0.60	0.9	212.01	0.03	1.2	0.03
	1.36	0.11	0.55	0.9	208.47	0.03	1.2	0.03

Cuadro 4.2: Energía cinética, tasa de disipación de energía, escalas características turbulentas y Re_λ del flujo de acuerdo al diámetro de boquilla

4.2. Visualización de los filamentos de fluido viscoso en un medio turbulento

Con el fin de registrar la evolución temporal del diámetro promedio de los filamentos inyectados al centro de la cámara de turbulencia, se tomaron series de fotografías con una cámara de alta velocidad, de la manera descrita en el capítulo anterior. Para cada condición experimental, se inyectó un filamento de aceite de silicón a través del capilar implementado en la cámara de turbulencia. Una vez estable el filamento, lo cual fue posible dada la alta viscosidad de los aceites utilizados, se inició la toma de imágenes al activar las bombas simultáneamente. Con esto se producía un flujo turbulento isotrópico, en cuyo centro se encontraba el filamento inicialmente estable. Como ejemplo, en las Figuras 4.6 - 4.11 se muestran las series de imágenes obtenidas para las dos viscosidades estudiadas, a una velocidad de inyección del 98 % del ciclo de trabajo de las bombas, para los distintos diámetros de boquillas utilizados.

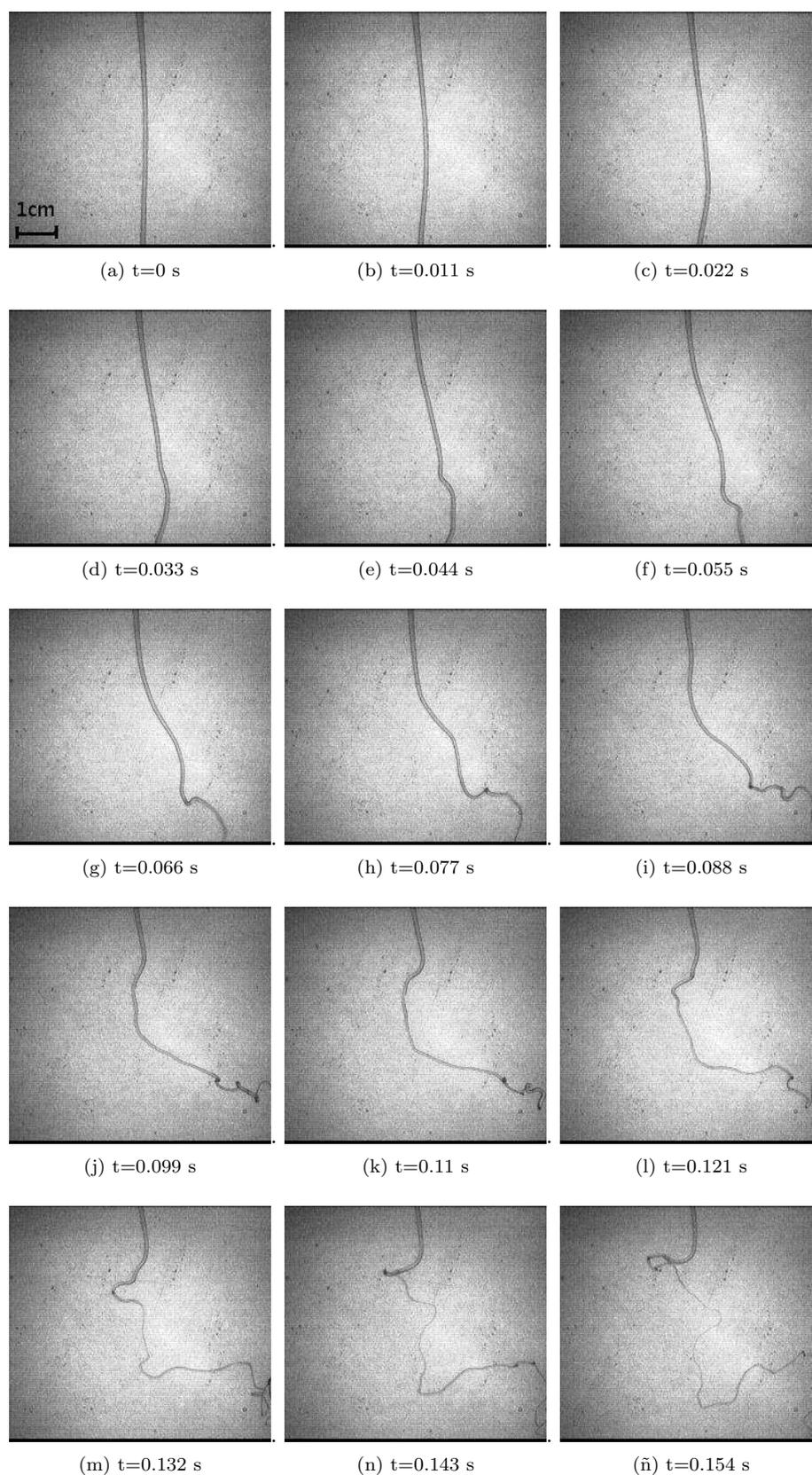


Figura 4.6: Secuencia de la ruptura de un filamento viscoso ($\mu = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) capturada a 1000 fps, teniendo un cuadro de visualización de aproximadamente 42 cm^2 . La turbulencia fue generada con el arreglo de boquillas de $\phi = 6.35 \text{ mm}$ a una velocidad de inyección de 3.29 m/s .

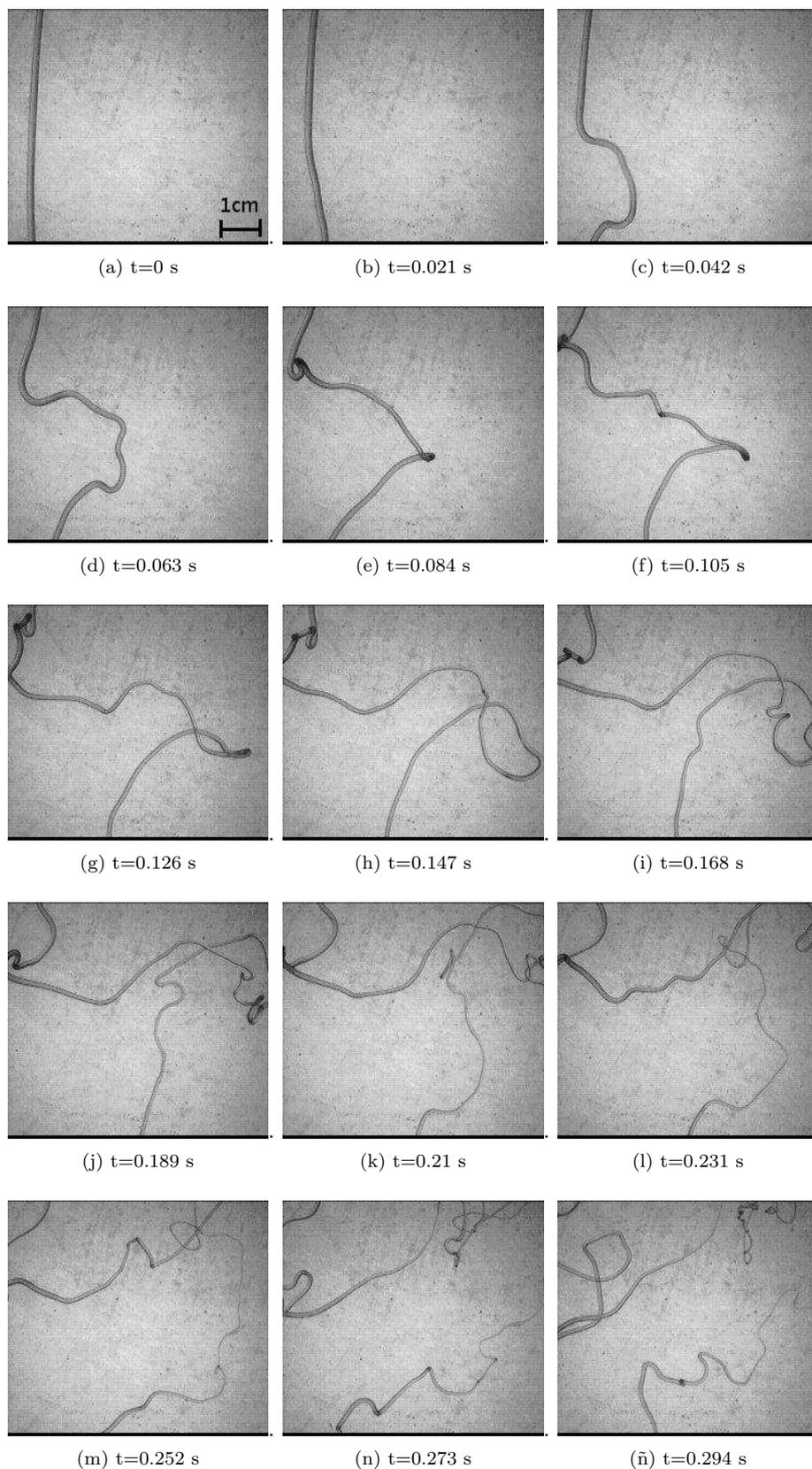


Figura 4.7: Secuencia de la ruptura de un filamento viscoso ($\mu = 30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) capturada a 1000 fps, teniendo un cuadro de visualización de aproximadamente 42 cm^2 . La turbulencia fue generada con el arreglo de boquillas de $\phi = 6.35 \text{ mm}$ a una velocidad de inyección de 3.29 m/s .

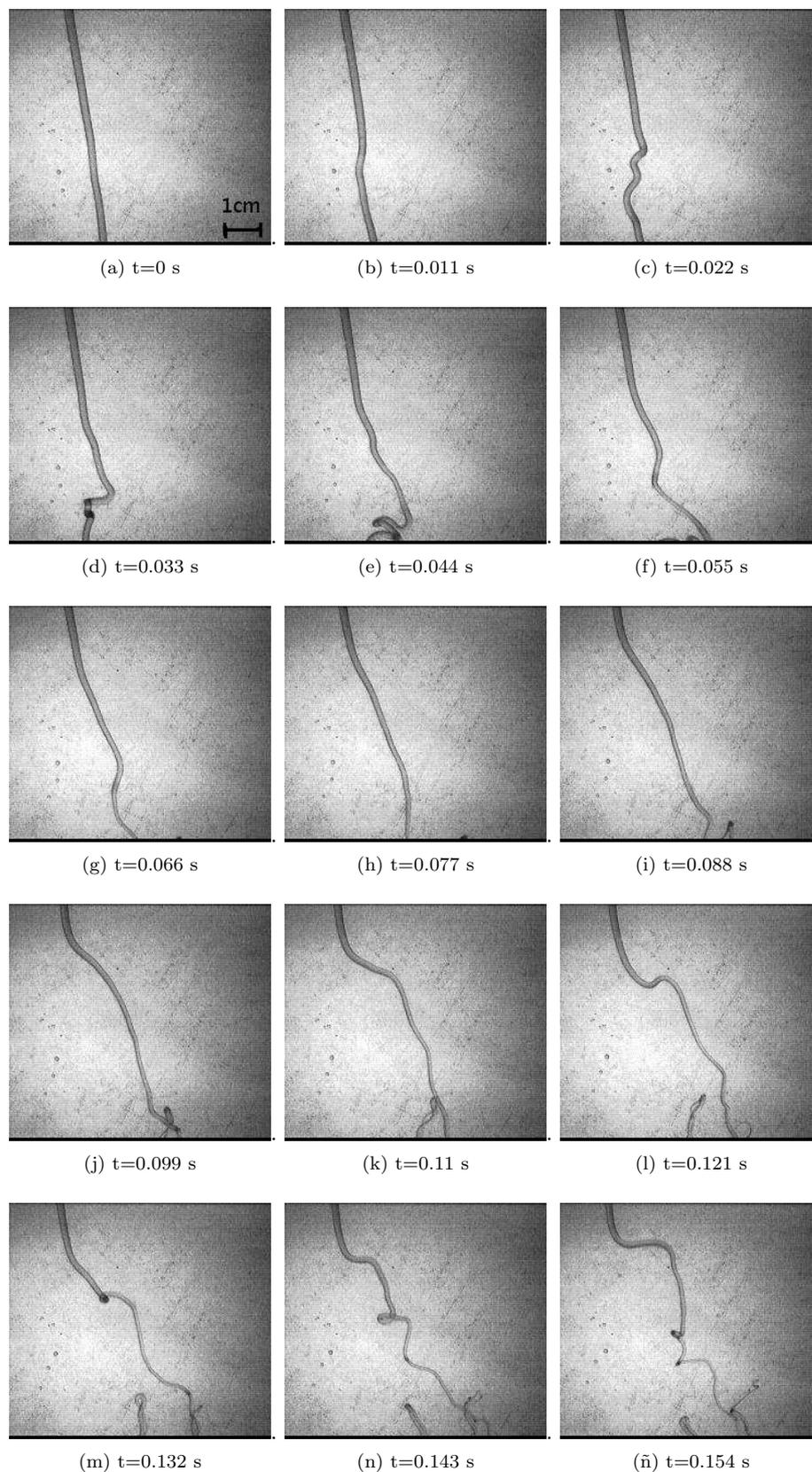


Figura 4.8: Secuencia de la ruptura de un filamento viscoso ($\mu = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) capturada a 1000 fps, teniendo un cuadro de visualización de aproximadamente 42 cm^2 . La turbulencia fue generada con el arreglo de boquillas de $\phi = 9.525 \text{ mm}$ a una velocidad de inyección de 2.53 m/s .

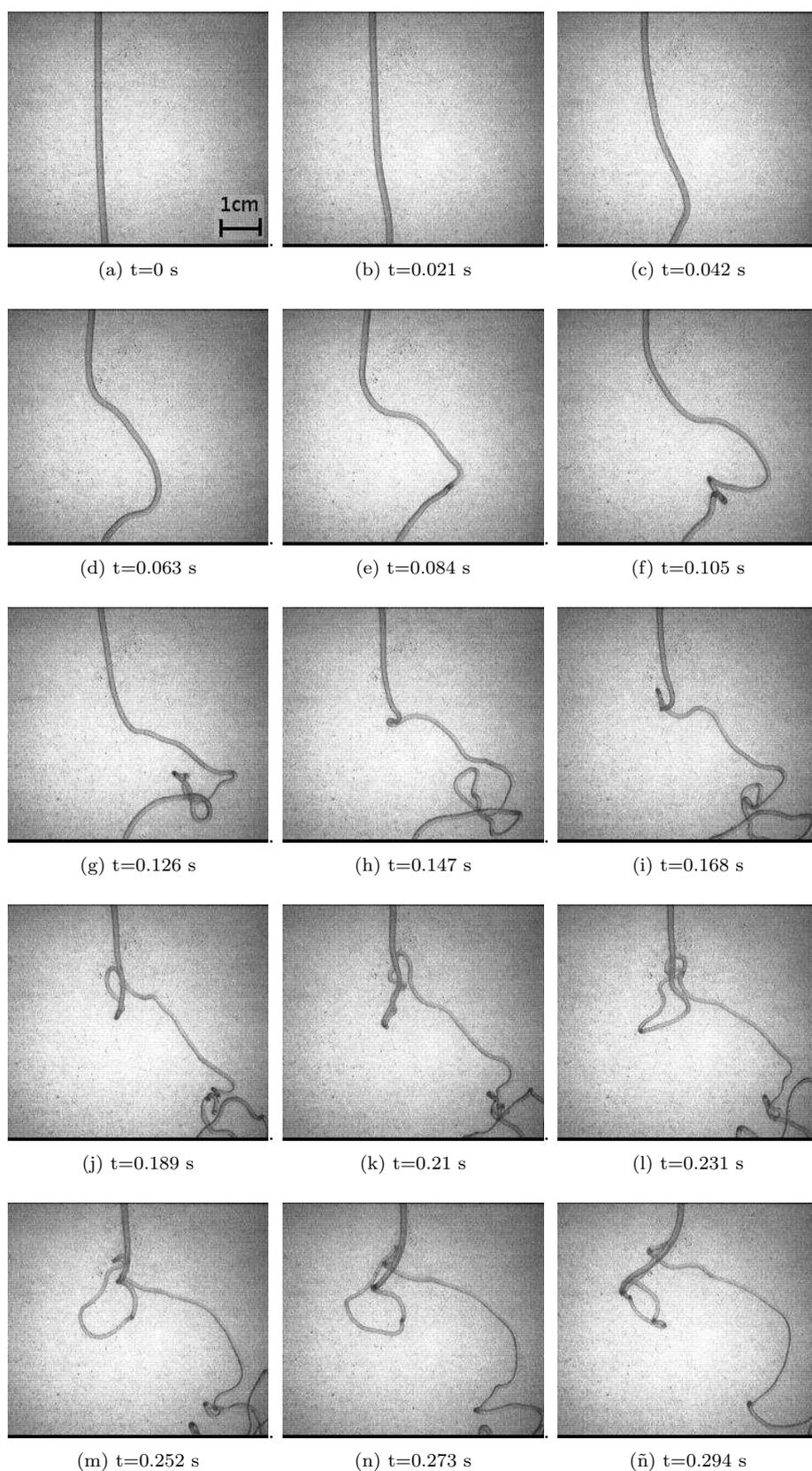


Figura 4.9: Secuencia de la ruptura de un filamento viscoso ($\mu = 30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) capturada a 1000 fps, teniendo un cuadro de visualización de aproximadamente 42 cm^2 . La turbulencia fue generada con el arreglo de boquillas de $\phi = 9.525 \text{ mm}$ a una velocidad de inyección de 2.53 m/s .

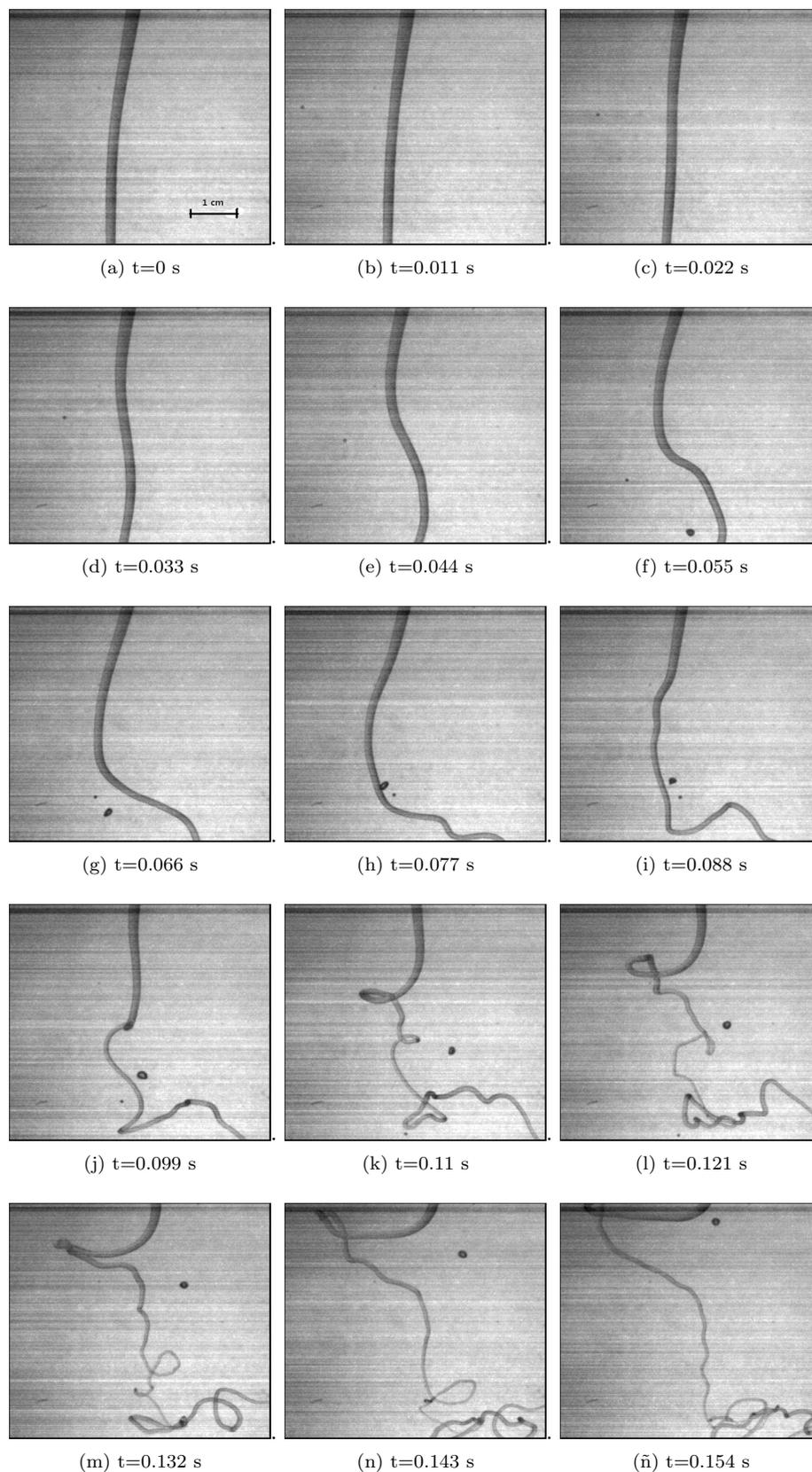


Figura 4.10: Secuencia de la ruptura de un filamento viscoso ($\mu = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) capturada a 4000 fps, teniendo un cuadro de visualización de aproximadamente 31 cm^2 . La turbulencia fue generada con el arreglo de boquillas de $\phi = 12.70 \text{ mm}$ a una velocidad de inyección de 2.32 m/s .

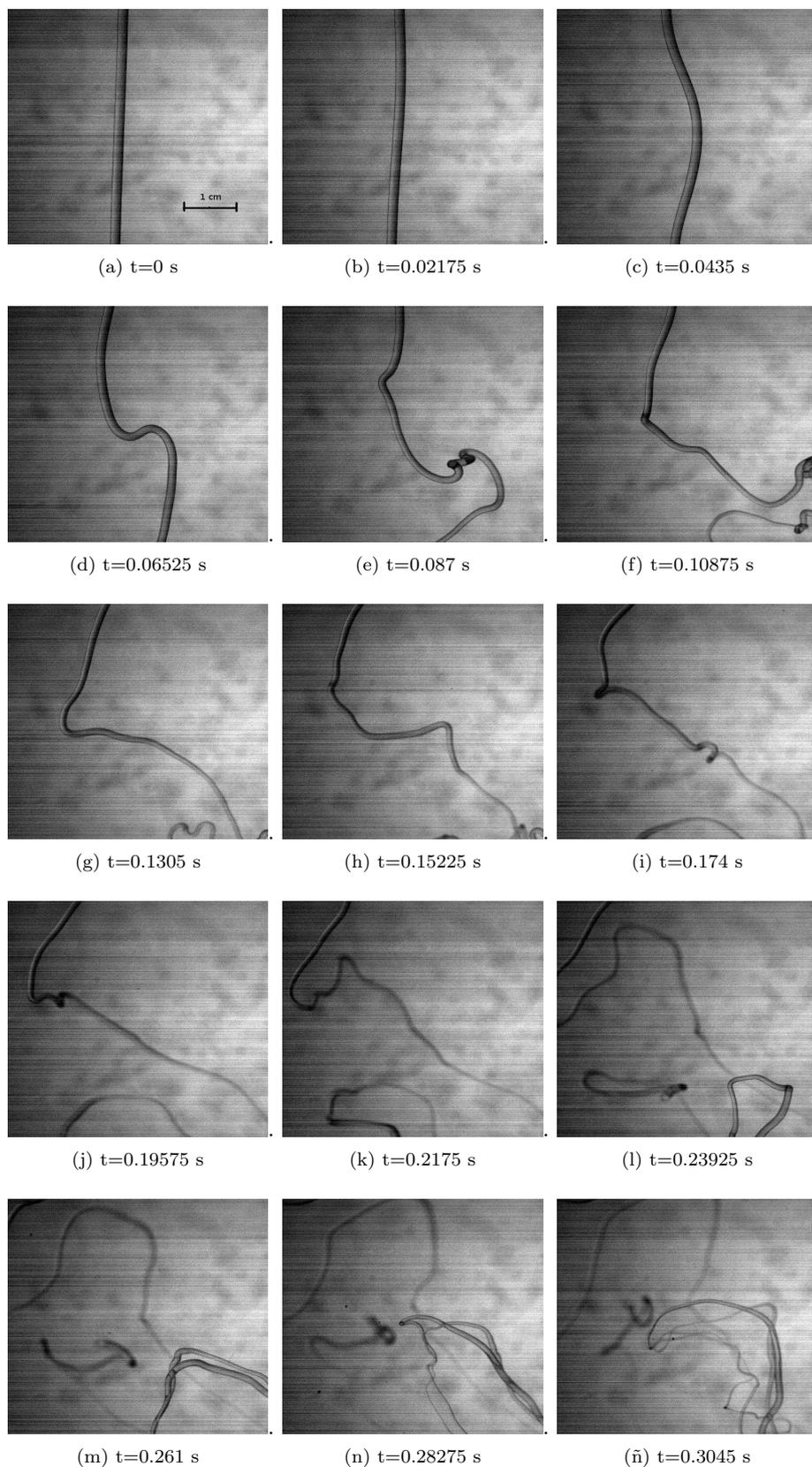


Figura 4.11: Secuencia de la ruptura de un filamento viscoso ($\mu = 30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) capturada a 4000 fps, teniendo un cuadro de visualización de aproximadamente 31 cm^2 . La turbulencia fue generada con el arreglo de boquillas de $\phi = 12.70 \text{ mm}$ a una velocidad de inyección de 2.32 m/s .

Es importante señalar que en esta sección no se presentan los resultados de la velocidad correspondiente al 100 % del ciclo de trabajo de las bombas. Esto se debe a que, de acuerdo con los resultados presentados en la sección anterior, este caso se caracteriza por tener una intermitencia significativa en la velocidad de giro de los motores de las bombas, la cual se ve reflejada en una gran dispersión de la distribución normal de la velocidad al centro de la cámara (ver Figura 4.2). Como resultado, las magnitudes de los esfuerzos de Reynolds ($\overline{\rho u' u'}$) para las direcciones x y y del plano en estudio no son similares, como en los casos en los que la velocidad fue regulada. Por esta razón, dicha condición experimental no fue considerada para el análisis general de la reducción del diámetro del filamento.

A partir de las visualizaciones obtenidas, fue posible analizar el proceso de adelgazamiento de los filamentos para cada condición. El efecto de la viscosidad fue el más evidente, ya que - a una misma velocidad de inyección y tamaño de boquilla- el filamento con menor viscosidad se elongó más rápidamente. En cambio, el filamento con viscosidad más alta tendía a enrollarse significativamente a medida que se elongaba, como consecuencia del flujo al que estaba sujeto. Por otro lado, comparando filamentos de la misma viscosidad sujetos a una distinta velocidad de inyección, se observó que aquellos que se encontraban sujetos a una menor intensidad turbulenta tienden a enroscarse en sí mismos formando estructuras más estables al flujo.

Por otro lado, cabe mencionar que en ninguna visualización se captó la ruptura de algún filamento. Aparentemente, la ruptura ocurre a diámetros muy pequeños del filamento. El arreglo experimental y óptico utilizados no permitieron observar este fenómeno de manera directa. Sin embargo, a partir de las imágenes adquiridas, se estudió el desarrollo temporal del diámetro promedio de los filamentos inyectados en el área de visualización y, con ello, la tasa de elongación del filamento. Este proceso se describe a continuación.

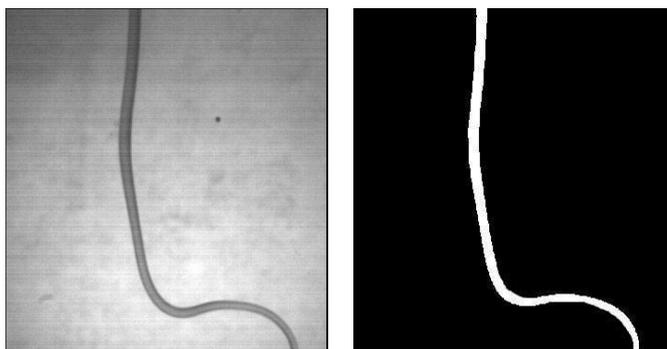
4.3. Procesamiento de imágenes

Una vez capturadas las imágenes, estas fueron procesadas digitalmente para poder seguir el movimiento del filamento y, con esto, la disminución de su diámetro. Con este fin se elaboró un programa en MATLAB (Apéndice II) mediante el cual se filtraron las imágenes para eliminar los gradientes de luz del fondo y encontrar el perfil del filamento en cada cuadro. Asimismo, se binarizó cada imagen de manera que sólo el filamento aparece en éstas (Figura 4.12).

Una vez procesadas las imágenes, el cálculo del diámetro se llevó a cabo a partir del área y del perímetro del filamento en la imagen binarizada. Suponiendo que el filamento está formado por N rectángulos delgados, donde la base de cada uno (w) corresponde al diámetro del filamento, la razón del área y el perímetro del filamento es:

$$\frac{A}{P} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i w_i}{2 \sum_{i=1}^N (L_i + w_i)}; \quad (4.11)$$

donde A es el área del filamento, P el perímetro del filamento, N la cantidad de rectángulos que forman al filamento y w_i y L_i la base y altura de cada segmento, respectivamente. Si se factoriza



(a) Imagen adquirida con la cámara de alta velocidad a una velocidad de inyección de 1.49 m/s ($\mu_o = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)
 (b) Imagen procesada digitalmente con MATLAB a una velocidad de inyección de 1.49 m/s ($\mu_o = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)

Figura 4.12: Ejemplo del procesamiento digital de imágenes. La imagen se binarizó aplicando un filtro gaussiano y sintonizando un umbral de 0.90 para encontrar el borde del filamento.

L_i de la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{A}{P} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{2 \sum_{i=1}^N (1 + \frac{w_i}{L_i})} \quad (4.12)$$

Debido a que se supusieron rectángulos delgados ($w_i/L_i \ll 1$), la ecuación anterior se simplifica:

$$\frac{A}{P} \approx \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{2N} \quad (4.13)$$

Entonces, el diámetro promedio del filamento ($\bar{w} = \sum_{i=1}^N w_i/N$) se calculó como el doble de la razón del área y el perímetro del mismo:

$$\bar{w} = 2 \frac{A}{P} \quad (4.14)$$

Esto se llevó a cabo en cada una de las imágenes para obtener el registro temporal del diámetro por cada condición experimental. Como se puede observar en las Figuras 4.6 - 4.11, en un instante de tiempo posterior a la activación de las bombas, los filamentos comienzan a enrollarse y a elongarse simultáneamente. La rapidez con que esto se lleva a cabo depende directamente de la intensidad turbulenta y de la viscosidad del filamento. Resulta muy complicado, desde el punto de vista del análisis de imágenes, cuantificar el diámetro en regiones donde se observan “nudos”. Por lo tanto, se escogió un criterio para excluir estos tramos de la cuantificación del diámetro promedio.

La excentricidad de una región o área es un factor que determina el grado de desviación de una sección con respecto a una circunferencia y se puede calcular fácilmente del análisis de imágenes. Un valor elevado de este parámetro significa que una superficie es alargada. Por lo tanto, se escogió un valor umbral de la excentricidad ($e < 0.92$) para descartar zonas cortas correspondientes a la superposición de filamentos en la misma región. Además, es posible observar que el filamento sale del cuadro de visualización cuando es elongado. En ocasiones, segmentos del filamento vuelven a aparecer dentro del cuadro. Estas zonas fueron también excluidas del cálculo del diámetro medio, al haber omitido regiones con un área menor a 500 píxeles.

De esta manera, como resultado del programa elaborado se obtiene una gráfica del diámetro promedio como función del tiempo para cada serie de fotografías. Como ejemplo, se presenta la gráfica obtenida para un filamento con una viscosidad de $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, a una velocidad de inyección de 1.49 m/s (Figura 4.13). En esta gráfica, al igual que en todos los casos analizados, se observan tres etapas principales en el proceso de estiramiento del filamento:

1. Pérdida de la estabilidad. Esta etapa se caracteriza por presentar muy poca variabilidad del diámetro del filamento. Esto se debe a que los primeros instantes después de haberse activado las bombas, ocurre un proceso transitorio durante el cual se establece el flujo turbulento isotrópico. Al ir progresando la transición hacia un flujo turbulento, la lucha entre la tensión interfacial y los esfuerzos turbulentos dan lugar a inestabilidades que, durante este corto intervalo de tiempo, viajan a través del filamento en forma de ondas con distintas amplitudes.
2. Formación de nuevas estructuras. Como respuesta a las perturbaciones superficiales impuestas por el flujo turbulento, se continúan generando múltiples ondas inestables. Dependiendo de su amplitud de onda, éstas se atenúan o amplifican. Por otro lado, el carácter aleatorio y vorticoso del flujo turbulento deforman al filamento, de manera que éste comienza a elongarse. De esta manera, como respuesta a estos efectos, el filamento comienza a enrollarse en sí mismo. Estas nuevas estructuras son más resistentes al flujo y a las inestabilidades superficiales, razón por la cual en esta etapa el decaimiento del diámetro se da pausadamente.
3. Ruptura del filamento. Debido a que la elongación del filamento se da más rápidamente que la formación de nudos, existen regiones del filamento significativamente deformadas. Es en esta etapa donde la disminución del diámetro se da más rápida y significativamente, resultado de los esfuerzos turbulentos y la amplificación de las ondas inestables en el filamento. Esto conlleva a la ruptura del filamento en algunas regiones y la continua elongación del mismo en otras, es decir, en esta etapa es donde comienza la formación de gotas.

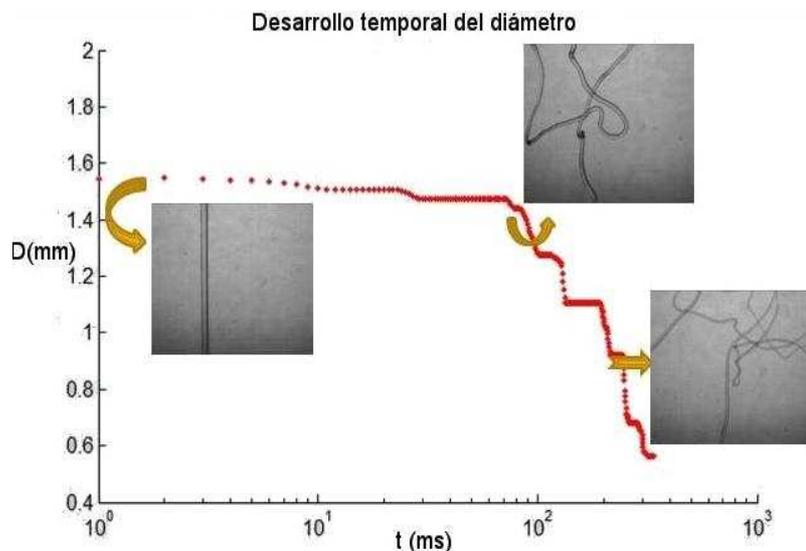


Figura 4.13: Desarrollo temporal del diámetro de un filamento de viscosidad $\mu_0 = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a una velocidad de 1.36 m/s .

4.4. Determinación de la elongación del filamento

4.4.1. Elongación característica del sistema

A partir de las gráficas de la descripción temporal del diámetro del filamento, se determinó una elongación característica para cada condición experimental. Como se mencionó en la sección anterior, todas las gráficas obtenidas muestran regiones en las cuales el diámetro aparentemente permanece constante. Sin embargo, se observó que en los periodos de tiempo en los que se observa adelgazamiento, el diámetro del filamento obedece a un decaimiento exponencial:

$$D = D_0 \exp(-Bt); \quad (4.15)$$

donde D es el diámetro instantáneo, D_0 es el diámetro inicial y la constante B se obtiene del ajuste de los datos experimentales. La Figura 4.14 muestra las mediciones experimentales correspondientes a la Figura 4.13. En esta figura se muestran los ajustes donde la relación exponencial es apropiada. La constante B es, de hecho, la elongación característica del filamento. Si se realiza un ajuste de cada región de estiramiento, es posible obtener un coeficiente B_i por cada región. De este modo, la tasa de elongación promedio se obtiene como el promedio de dichos coeficientes en un experimento dado.

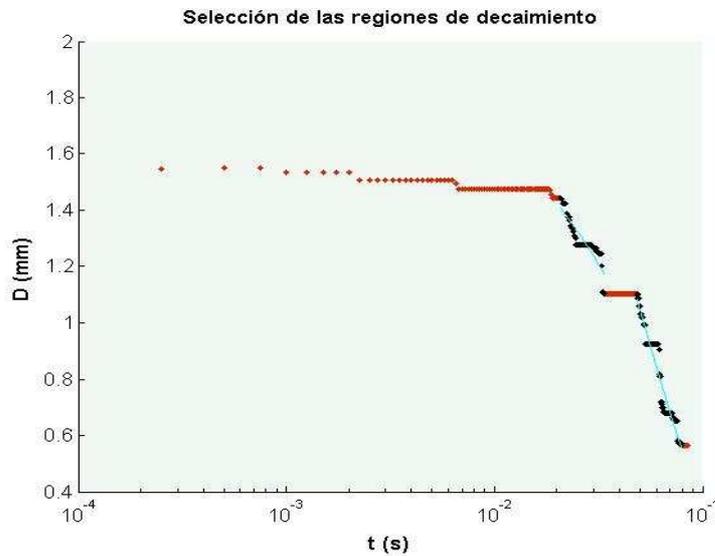


Figura 4.14: Selección de las regiones de decaimiento para el cálculo de la elongación característica para un filamento con viscosidad $\mu_0 = 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a una velocidad de 1.36 m/s

Como el diámetro inicial no fue un parámetro experimental controlado, este no fue el mismo para todos los casos. Por esta razón, el valor del diámetro instantáneo no es un parámetro apropiado para determinar el grado de deformación del filamento. No obstante, la elongación característica, independientemente de cual haya sido el diámetro inicial, es una variable directamente relacionada con el tipo de flujo al que el filamento haya estado sometido. De este modo, al comparar la elongación característica de un filamento con cierta viscosidad μ , con los esfuerzos de Reynolds, para las

distintas velocidades de inyección, es posible determinar en qué casos se presentará la ruptura más rápidamente.

En las Figuras 4.15 (a - c) se presentan las gráficas de elongación característica (B) con respecto a la magnitud de los esfuerzos turbulentos ($\overline{\rho u' u'}$) para los distintos tamaños de boquilla utilizados. Independientemente del tamaño de la boquilla, todos los casos siguen la misma tendencia. A una mayor intensidad turbulenta, la rapidez de elongación del filamento es mayor y, con ello, se presenta un factor de elongación más elevado. Asimismo, los filamentos con una viscosidad dinámica menor presentan una elongación característica más alta y, por lo tanto, la recta asociada cuenta con una pendiente más pronunciada que la de los filamentos con mayor viscosidad. Esto se traduce en una rapidez de deformación mayor en los filamentos menos viscosos y, por lo tanto, la ruptura se lleva a cabo más rápidamente.

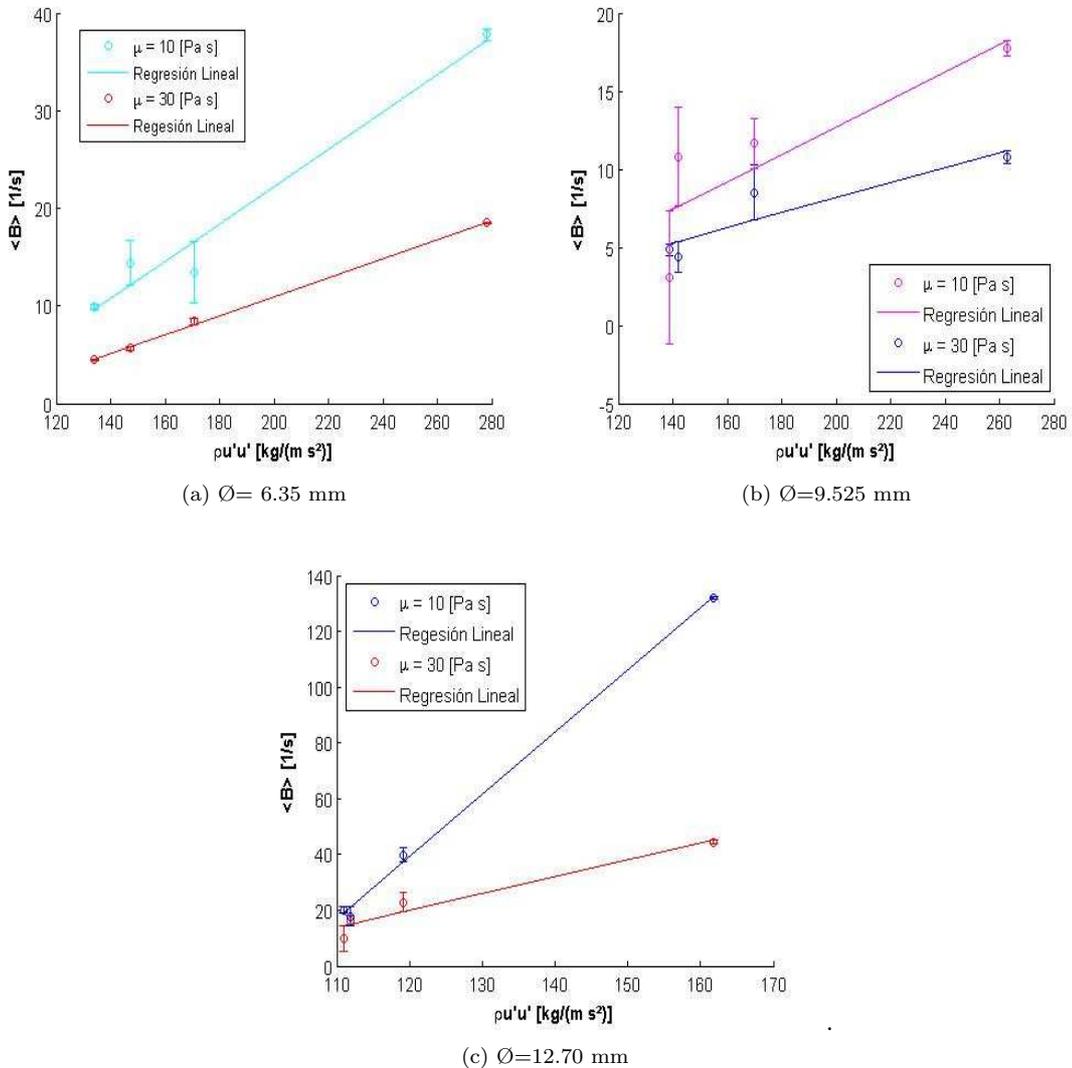


Figura 4.15: Elongación característica en función de la magnitud de los esfuerzos turbulentos para los distintos tamaños de boquilla empleados. En cada gráfica se muestra la elongación característica obtenida para las cuatro velocidades de inyección, para filamentos de distinta viscosidad.

En la Figura 4.16 se presentan las rectas asociadas a la elongación característica con respecto a los esfuerzos de Reynolds para todos los casos experimentales. A pesar de que todos los casos presentan el mismo comportamiento, en cuanto a que el filamento de menor viscosidad se caracteriza por estirarse más rápidamente, los filamentos asociados a las boquillas de mayor diámetro presentan elongaciones características más elevadas. De este modo, la recta con mayor pendiente es la correspondiente a una viscosidad de $\mu = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ para un tamaño de boquilla de 12.70 mm. A esta le sigue la correspondiente a un filamento de viscosidad $\mu = 30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, para el mismo tamaño de boquilla. De acuerdo a los datos experimentales adquiridos, los filamentos de viscosidad $\mu = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ de las boquillas de 6.35 mm y 9.525 mm de diámetro se rompen posteriormente, en dicho orden. Asimismo, los filamentos que necesitan mayor tiempo para romperse son los de una viscosidad de $\mu = 30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ para dichas boquillas en el mismo orden.

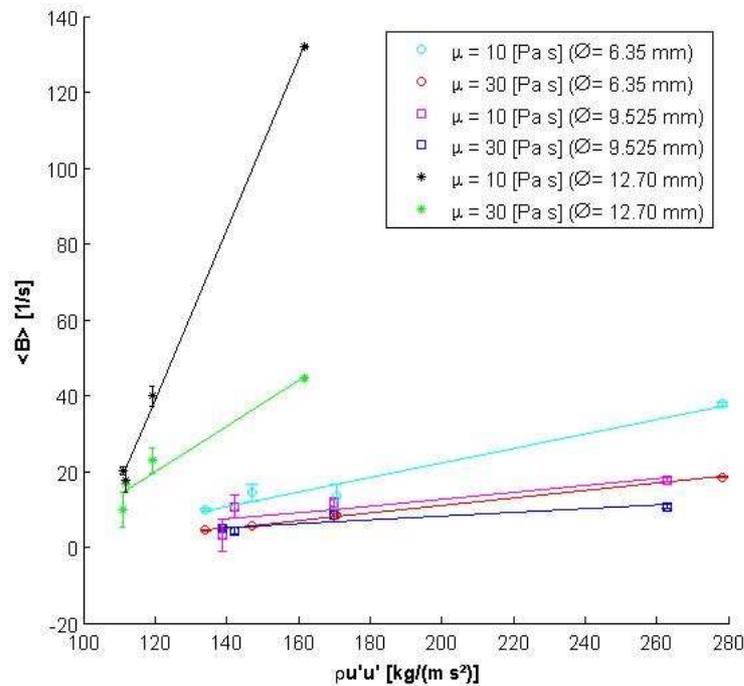


Figura 4.16: Elongación característica en función de la magnitud de los esfuerzos turbulentos para todas las condiciones experimentales.

Como se describió en el primer capítulo, todos los flujos turbulentos son por naturaleza vorticosos. De este modo, existen estructuras coherentes que abarcan un gran rango de tamaños, denominados *remolinos*. En la Figura 4.17 se ilustra la coexistencia de estas estructuras en el flujo en el cual está inmerso el filamento. Estos remolinos son los responsables de disipar la energía del sistema, por lo que tienen muy corta duración. Sin embargo, un factor importante en el proceso de ruptura es la interacción entre los remolinos y el filamento a lo largo del proceso.

En este trabajo se experimentó con tres diámetros de boquilla distintos y se tuvieron cuatro velocidades de inyección para cada arreglo. El efecto más importante de disminuir el diámetro de la boquilla es la producción de una mayor intensidad turbulenta en el flujo. Asimismo, la escala característica turbulenta, es decir, los remolinos más grandes generados son cada vez de menor tamaño. Por otro lado, para un tamaño de boquilla específico, al incrementar la velocidad de

inyección, también se aumenta la intensidad turbulenta. La principal diferencia es que el rango de tamaños de los remolinos permanece constante.

De este modo, al aumentar la velocidad de inyección, se genera una mayor cantidad de remolinos. Como consecuencia de lo anterior, la tasa de disipación de energía del sistema aumenta. En todos los casos experimentales, en cada instante de tiempo existen remolinos de diferentes tamaños y su interacción con el filamento es distinta dependiendo de la escala del remolino. Los remolinos más grandes son del tamaño de la boquilla empleada. Estos, al ser de mayor tamaño que el diámetro inicial del filamento, estiran al filamento significativamente provocando la súbita disminución de su diámetro. Por otro lado, los remolinos que se encuentran en la escala de Taylor, aunque son tres órdenes de magnitud menores que el diámetro inicial del filamento no son los suficientemente energéticos como para vencer a la tensión interfacial entre ambos fluidos.

Cuando los remolinos entran en contacto con el filamento, lo deforman y enroscan formando nudos, más sin embargo no provocan la ruptura del mismo. Cuando la ruptura se da debido a los esfuerzos turbulentos, son los remolinos en la escala de Kolmogorov los que la provocan. Estos remolinos, al ser los últimos en la cascada turbulenta, son los que cuentan con menor energía, la cual disipan de manera viscosa. De este modo, cuando la producción de remolinos de este tamaño es lo suficientemente grande, éstos logran deformar al filamento hasta su ruptura.

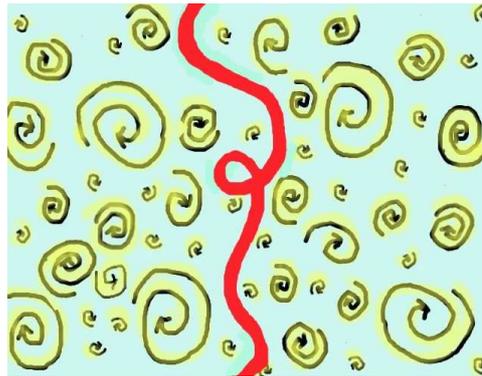


Figura 4.17: Esquema de la coexistencia de remolinos de distintos tamaños en el flujo turbulento.

En la literatura se ha reportado que la relación entre el diámetro de filamento o gota y la escala de Kolmogorov del sistema juega un papel fundamental en la ruptura [37]. De acuerdo al tipo de sistema que se estudie existe una proporción para la cual el tiempo de ruptura del filamento es el mínimo. Esto se refleja en la gráfica de la Figura 4.16. El flujo producido con las boquillas de 12.70 mm de diámetro provocan la ruptura más rápidamente, por lo que la proporción entre el diámetro de los filamentos inyectados y los remolinos en la escala de Kolmogorov en dicho sistema son los óptimos. De igual forma, de acuerdo a los resultados presentados, para un mismo diámetro de boquilla, al incrementar la velocidad de inyección se obtuvo una elongación característica mayor. Asimismo, la recta asociada al filamento de menor viscosidad presentó una pendiente más pronunciada, al haberse deformado más rápidamente.

4.4.2. Deformación del filamento

La ruptura del filamento se lleva a cabo, ya sea debido a la inestabilidad capilar o a los esfuerzos turbulentos. Sin embargo, en ambos casos el filamento se deforma en gran medida antes de romperse.

Como se mencionó en el Capítulo 2, el volumen del filamento inyectado permaneció constante para todos los casos. De esta manera, tanto la variación del diámetro como de la longitud del filamento con respecto al tiempo se determinaron considerando al filamento como un cilindro de longitud L y volumen constante V , cuyo diámetro está definido por la Ecuación 4.14. De esta manera, despejando la longitud L de la ecuación del volumen de un cilindro se tiene:

$$L = \frac{4V}{\pi D^2}; \quad (4.16)$$

donde D es el diámetro instantáneo del filamento. Así, derivando la longitud con respecto al tiempo, se obtiene su variación a lo largo de todo el experimento:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{8VB}{\pi} (D_0 \exp(-Bt))^{-2} \quad (4.17)$$

En las Figuras 4.17 - 4.19 se presenta dicha variación con respecto al tiempo para cada intensidad turbulenta, de acuerdo al tamaño de boquilla empleado. Todas las curvas graficadas siguen la misma tendencia, siendo los filamentos de menor viscosidad los que se deforman de manera más importante. Asimismo, para una misma boquilla, los filamentos sujetos a una mayor intensidad turbulenta alcanzan una mayor elongación y, por lo tanto, una mayor reducción del diámetro en el mismo periodo de tiempo.

Por otro lado, para determinar la deformación real del filamento debido al flujo turbulento, se empleó la siguiente ecuación [3]:

$$\varepsilon = \int \frac{dL}{L} = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln \left(\frac{A}{A_0} \right) = \ln \left(\frac{D_0^2}{D^2} \right); \quad (4.18)$$

donde D_0 es el diámetro inicial del filamento y D el diámetro final. Debido a que no se pudo capturar la ruptura en ningún caso experimental no fue posible determinar el diámetro antes de que ésta ocurriera. Sin embargo, para comparar el grado de deformación alcanzado de acuerdo a las condiciones experimentales se empleó una longitud capilar característica λ definida de la siguiente manera:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad (4.19)$$

Esta longitud se emplea como una escala para cuerpos que están sujetos a fuerzas de cuerpo como la gravedad y a fuerzas de superficie debidas a la tensión superficial. De esta manera, se obtuvo una sola longitud capilar característica para ambos fluidos, dado que su densidad y tensión superficial son iguales. Así, la longitud capilar calculada fue de 0.0018 m.

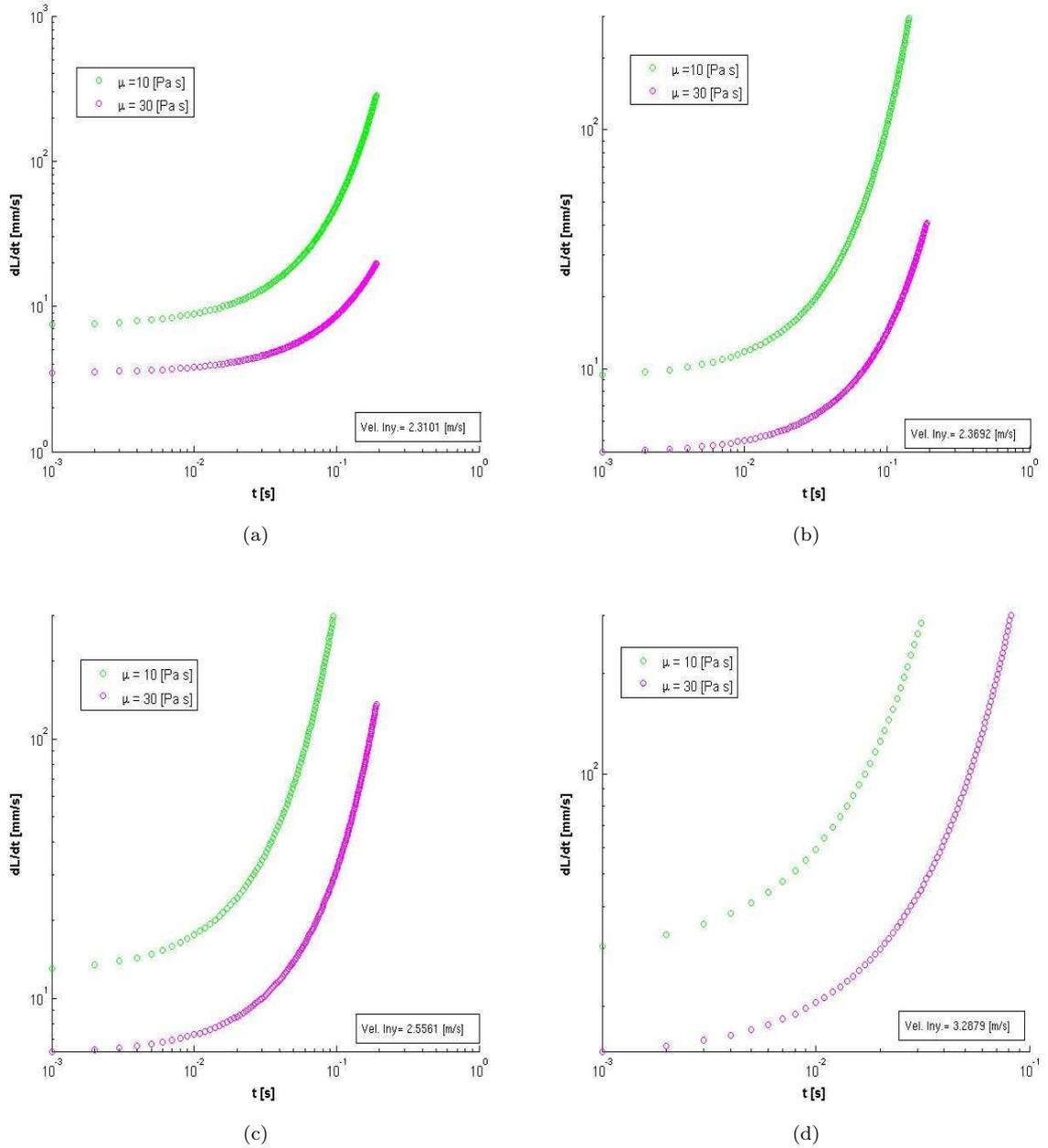


Figura 4.18: Variación de la longitud de filamentos de 10 y 30 [Pa·s] a distintas intensidades turbulentas generadas por un diámetro de inyección de $\varnothing = 6.35 \text{ mm}$

De esta manera, al sustituir el diámetro final D de la Ecuación 4.17 por la longitud capilar λ calculada, se obtuvo la elongación real del filamento para cada caso experimental. De igual forma, a partir de la Ecuación 4.14 del diámetro, se efectuó la misma sustitución para estimar el tiempo necesario para que un filamento de diámetro inicial D_0 se deforme hasta alcanzar un diámetro en la escala capilar:

$$t_{ruptura} = -\frac{1}{B} \ln \left(\frac{D_\lambda}{D_0} \right); \quad (4.20)$$

donde D_λ es el diámetro del filamento en una escala capilar y t es el tiempo necesario para obtener dicho diámetro a partir del diámetro inicial D_0 . Los resultados obtenidos a partir de este análisis se muestran en la Tabla 4.3. Asimismo, en la Figura 4.21 (a-c) se muestran las gráficas del tiempo de ruptura en función de la velocidad de inyección.

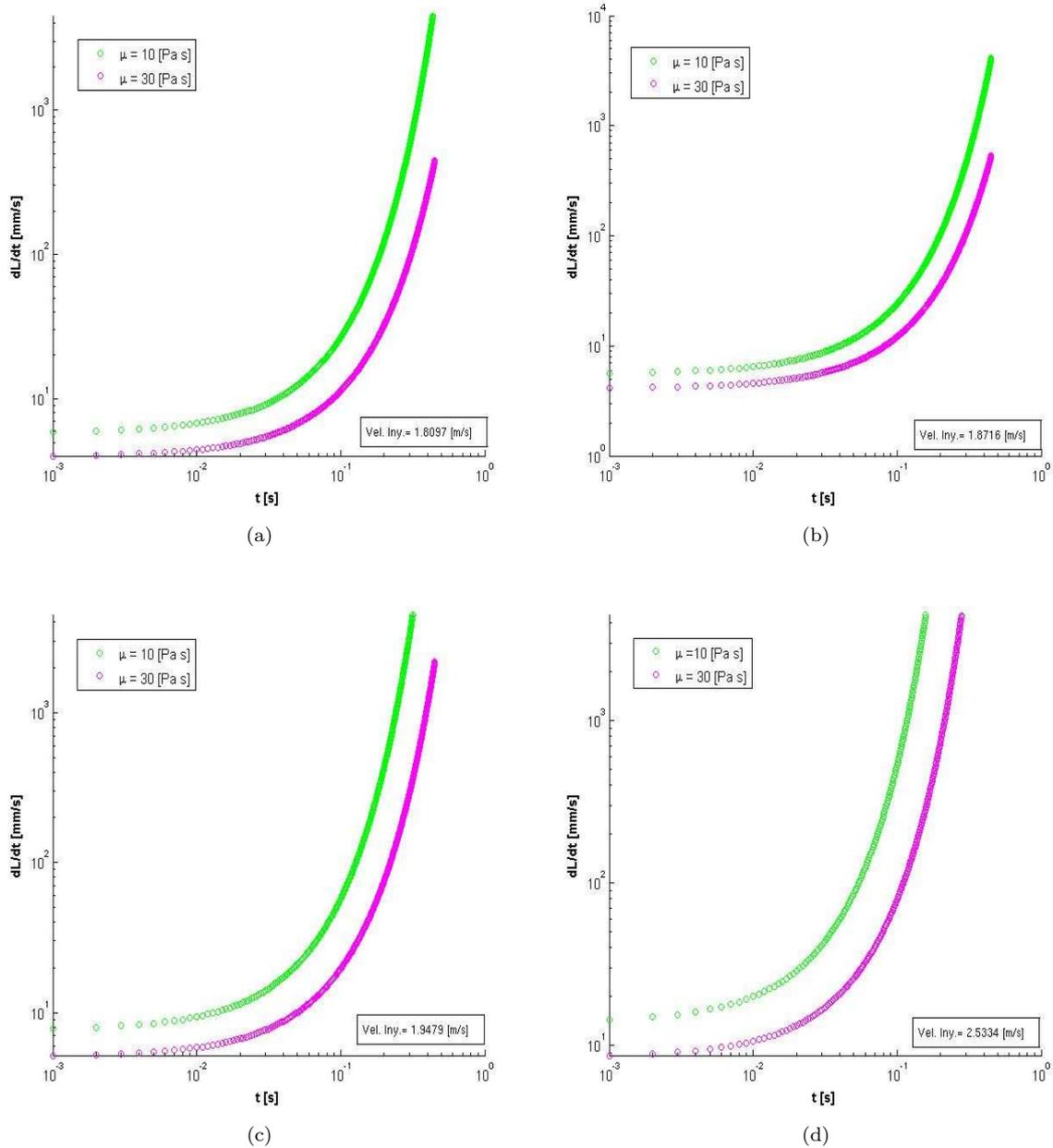


Figura 4.19: Variación de la longitud de filamentos de 10 y 30 [Pa·s] a distintas intensidades turbulentas generadas por un diámetro de inyección de $\varnothing = 9.525 \text{ mm}$

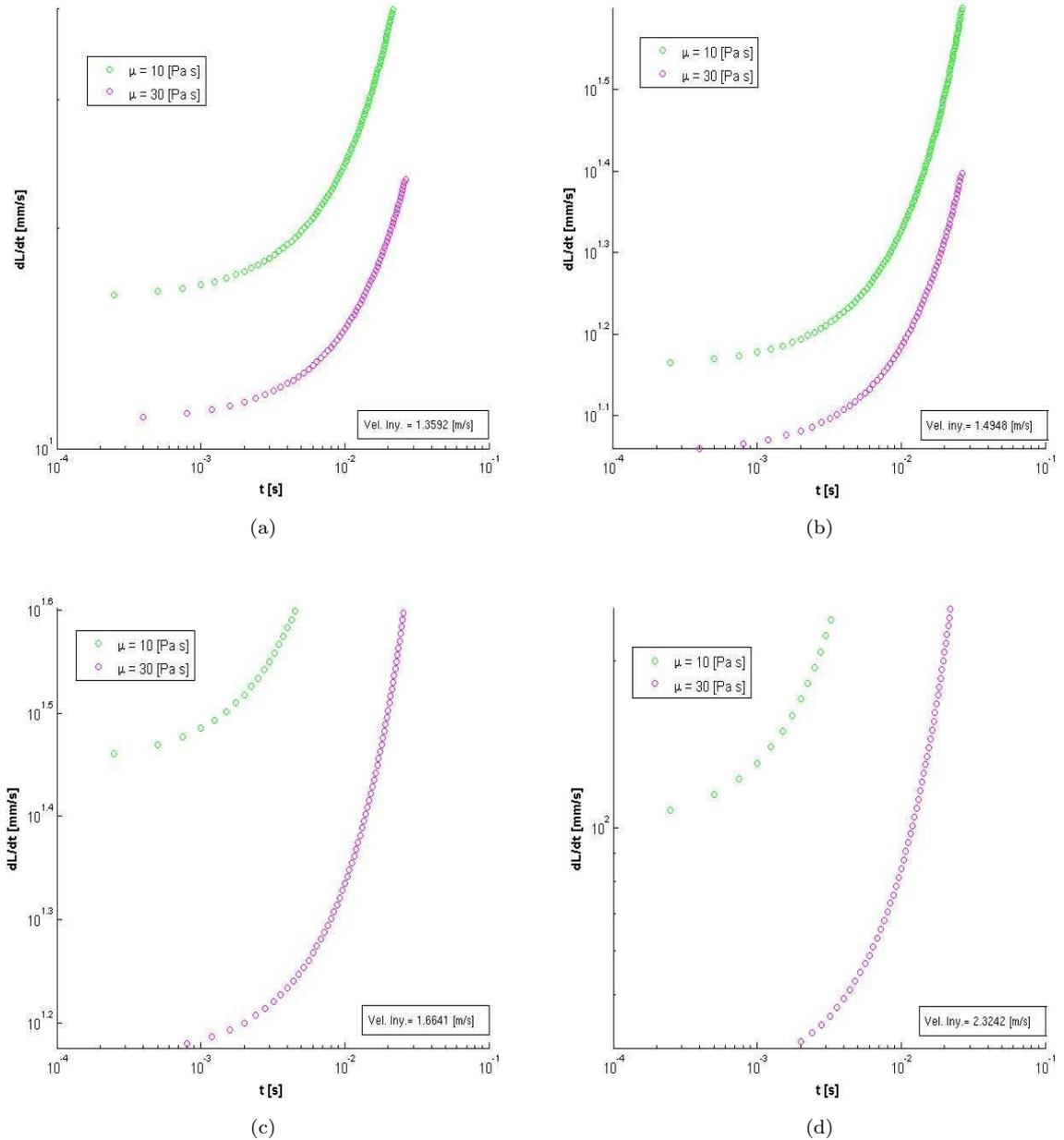


Figura 4.20: Variación de la longitud de filamentos de 10 y 30 [Pa·s] a distintas intensidades turbulentas generadas por un diámetro de inyección de $\varnothing = 12.70 \text{ mm}$

De acuerdo a los resultados de elongación presentados, en todos los casos los filamentos tuvieron aproximadamente el mismo grado de deformación, a pesar de que el diámetro inicial no fue el mismo para todos los casos. Por otro lado, el tiempo transcurrido para que los filamentos alcanzaran la escala capilar varió del mismo modo de acuerdo a la intensidad turbulenta y tamaño de boquilla. Así, para un mismo tamaño de boquilla, los filamentos de menor viscosidad alcanzaron un diámetro capilar más rápidamente que los de mayor viscosidad. Al incrementar la intensidad turbulenta, el tiempo se redujo para ambos casos. Cabe señalar que los filamentos deformados por el flujo generado por las boquillas con mayor diámetro fueron los primeros que alcanzaron la escala capilar, lo cual concuerda con los resultados presentados al inicio de esta sección.

\emptyset (mm)	μ (Pa s)	Velocidad de Inyección (m/s)	ε	t (s)
6.35	10	2.31	13.84	0.72
		2.37	13.65	0.56
		2.56	13.85	0.42
		3.29	14.03	0.19
	30	2.31	14.09	1.34
		2.37	13.91	1.29
		2.56	13.95	1.04
		3.29	14.00	0.67
9.525	10	1.81	13.84	0.91
		1.87	13.95	0.95
		1.95	13.79	0.68
		2.53	14.16	0.39
	30	1.81	13.74	1.50
		1.87	13.62	1.17
		1.95	14.13	0.87
		2.53	13.90	0.37
12.70	10	1.36	13.45	0.32
		1.49	11.96	0.31
		1.66	12.40	0.17
		2.32	12.28	0.05
	30	1.36	13.15	0.46
		1.49	13.63	0.46
		1.66	11.44	0.29
		2.32	13.74	0.15

Cuadro 4.3: Valores de elongación y tiempo capilar obtenidos para cada condición experimental.

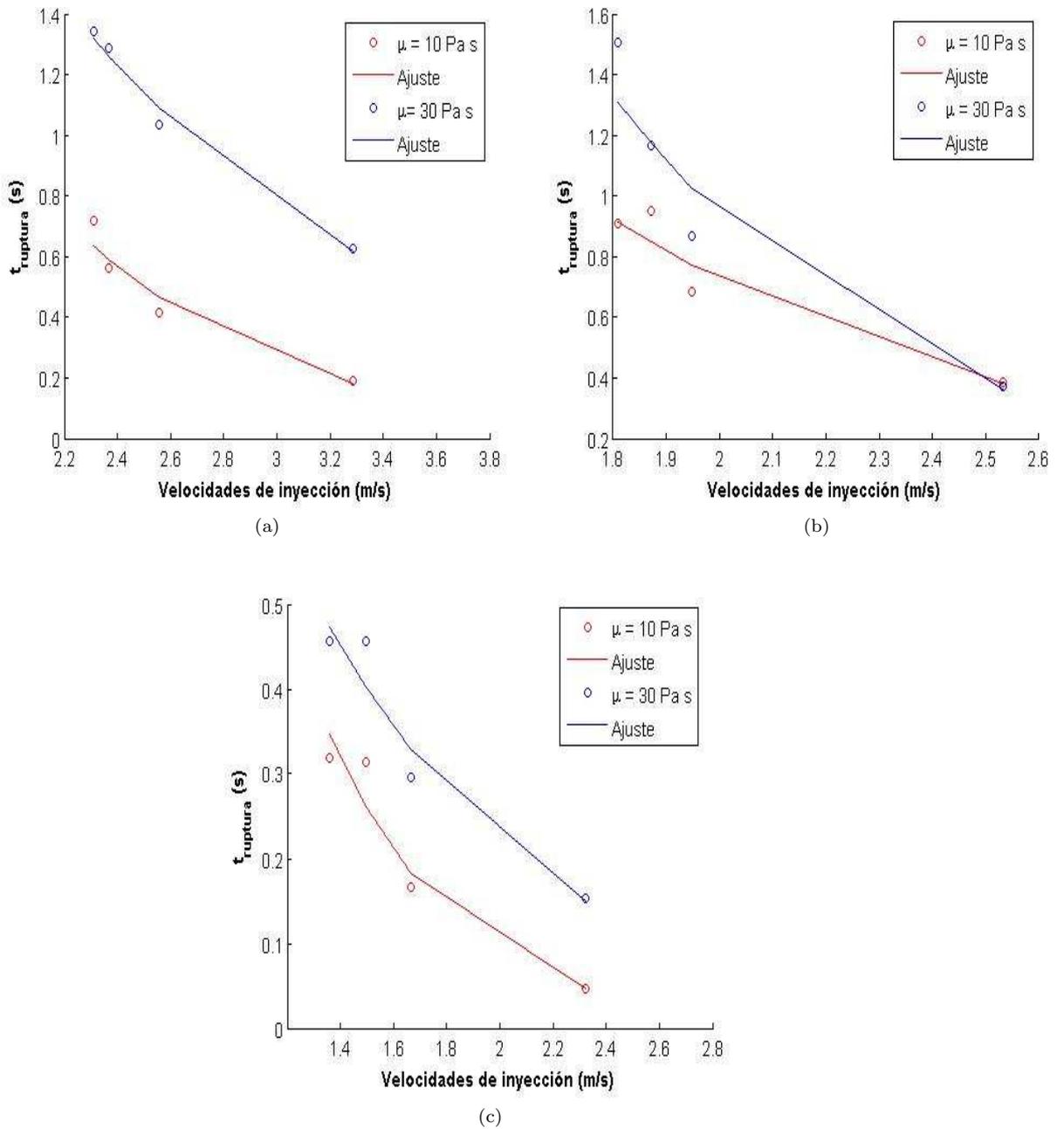


Figura 4.21: Variación de la longitud de filamentos de 10 y 30 [Pa s] a distintas intensidades turbulentas generadas por un diámetro de inyección de $\varnothing = 12.70 \text{ mm}$

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se analizó la deformación de filamentos viscosos en agua, proceso fundamental para entender el mecanismo de emulsificación de fluidos con altas viscosidades. El proceso de ruptura de un filamento aislado sometido a un flujo turbulento quasi-isotrópico se visualizó con una cámara de alta velocidad.

El flujo fue generado con la cámara de turbulencia isotrópica del Laboratorio de Reología (Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM), la cual consiste principalmente de un arreglo geométrico de seis boquillas confocales. Mediante la inyección de agua al centro de la cámara, se produce un volumen de turbulencia isotrópica en la cual fue inyectada el filamento. Con el objetivo de mejorar la isotropía, se le realizaron algunas modificaciones a la cámara siguiendo las recomendaciones del diseñador de la misma [22]. De esta manera, se elaboró un control electrónico para variar la velocidad de los motores de las bombas -y con ello la velocidad de inyección del agua- por medio de LabView. Asimismo, el arreglo geométrico de las boquillas se modificó para obtener un segundo plano de simetría.

Se establecieron cinco velocidades de inyección diferentes para caracterizar el flujo turbulento, que se generaron al variar el ciclo de trabajo de los motores de las bombas para las velocidades correspondientes al 92 %, 94 %, 96 %, 98 % y 100 %, del ciclo. Se tomó como la velocidad que se obtiene al conectar la bomba directamente al suministro. De este modo, se efectuaron mediciones con el PIV en el plano de estudio y se comprobó que el nivel de isotropía aumentó, en comparación con el trabajo presentado por Mancilla[22]. De acuerdo con los valores estadísticos calculados y las distribuciones de densidad de probabilidad presentados en este trabajo, el flujo generado al centro de la cámara es quasi-isotrópico y cuenta con un alto nivel de homogeneidad para todos los casos excepto el correspondiente al 100 % del ciclo. La intermitencia de los motores de las bombas en este caso se traducen en colas largas en el PDF de esta velocidad, es decir, hay una gran dispersión en los valores de velocidad en este caso. Como resultado, las magnitudes los esfuerzos turbulentos en la dirección x y y del plano son distintas. Por esta razón, a pesar de que el flujo es homogéneo, el nivel de isotropía es menor que en los demás casos. En general, los resultados obtenidos de la caracterización del flujo en el plano de estudio mostraron ser comparables con los producidos con arreglos similares presentados en la literatura.

Mediante el procesamiento de las imágenes adquiridas para las distintas condiciones experimentales, se midió la evolución temporal del diámetro del filamento en el plano de visualización. Se observó que, en todos los casos, el filamento se elonga de tal manera que su diámetro decae exponencialmente con respecto al tiempo. Asimismo, se identificaron tres etapas en el proceso de

ruptura, en las cuales se propagan ondas de inestabilidad capilar a través del filamento, al mismo tiempo que las estructuras coherentes o remolinos turbulentos interactúan con el filamento.

Ajustando las regiones de decaimiento del diámetro con una curva exponencial, se determinó una elongación característica B para cada condición experimental. Se obtuvo que los filamentos con menor viscosidad tienen una elongación característica mayor, es decir, se elongan más fácilmente. Asimismo, para un mismo tamaño de boquilla, al ir aumentando la intensidad turbulenta se adquieren elongaciones características más altas en el mismo periodo de tiempo. Sin embargo, una disminución del tamaño de boquilla no se tradujo en un aumento de la elongación característica. Se encontró que los filamentos deformados por un flujo generado por las boquillas más grandes presentaron elongaciones características superiores a los otros casos. Esto pudo haberse debido a que la interacción entre los remolinos producidos por dicho arreglo y el diámetro del filamento fue la más óptima, es decir, la proporción entre las escalas del diámetro y las escalas turbulentas fue tal que la ruptura se propició más fácilmente.

A partir de los datos del diámetro instantáneo obtenidos y haciendo uso de la longitud capilar característica, se calculó el tiempo de ruptura para todos los casos. Se observó que los filamentos de menor viscosidad se elongan significativamente en comparación con los de mayor viscosidad para las mismas condiciones experimentales. Asimismo, a una mayor intensidad turbulenta el filamento se deforma más rápidamente.

Por lo tanto, a mayor intensidad turbulenta (manteniendo constante el tamaño de la boquilla) el filamento menos viscoso se elonga más rápidamente, reduciendo su diámetro a tal grado que se rompe por causa de las inestabilidades capilares en su superficie. El filamento más viscoso, con las mismas condiciones experimentales, al no elongarse tan rápidamente no alcanza a reducir su diámetro de tal forma, pero se rompe debido a los efectos del flujo turbulento. A intensidades turbulentas bajas, la ruptura se da debido a la interacción entre los remolinos turbulentos y el filamento.

Trabajo futuro

Un aspecto interesante del proceso de ruptura de los filamentos es el papel que juega la proporción entre las escalas del filamento en un cierto instante de tiempo y las escalas de la turbulencia. Con el objetivo de determinar las condiciones turbulentas óptimas para que un filamento con un cierto diámetro se rompa, será necesario determinar dicha proporción. Asimismo, se debe efectuar un análisis dimensional para establecer, en base a los parámetros del experimento, el comportamiento general del sistema.

Apéndice I

El programa realizado en LabView para controlar la velocidad de las seis bombas genera un tren de pulsos de acuerdo a las especificaciones del usuario. A través de la interfaz gráfica, el usuario ingresa el porcentaje del ciclo de trabajo de las bombas (con un rango de 0% a 100%). De este modo, se bloquea el funcionamiento del PWM analógico y se transmite el tren de pulsos generado de la computadora a la etapa de potencia de cada controlador electrónico.

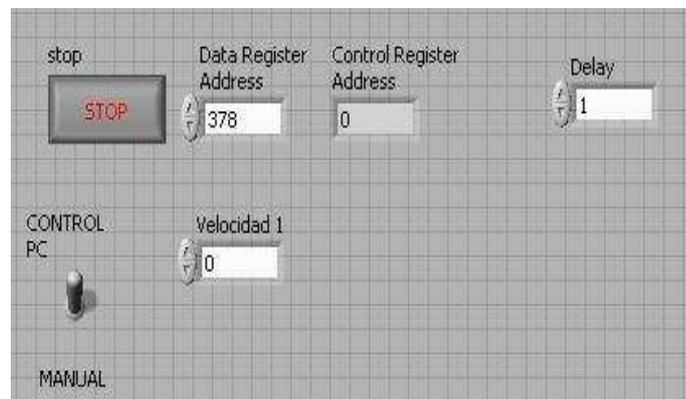


Figura 5.1: Panel frontal del programa

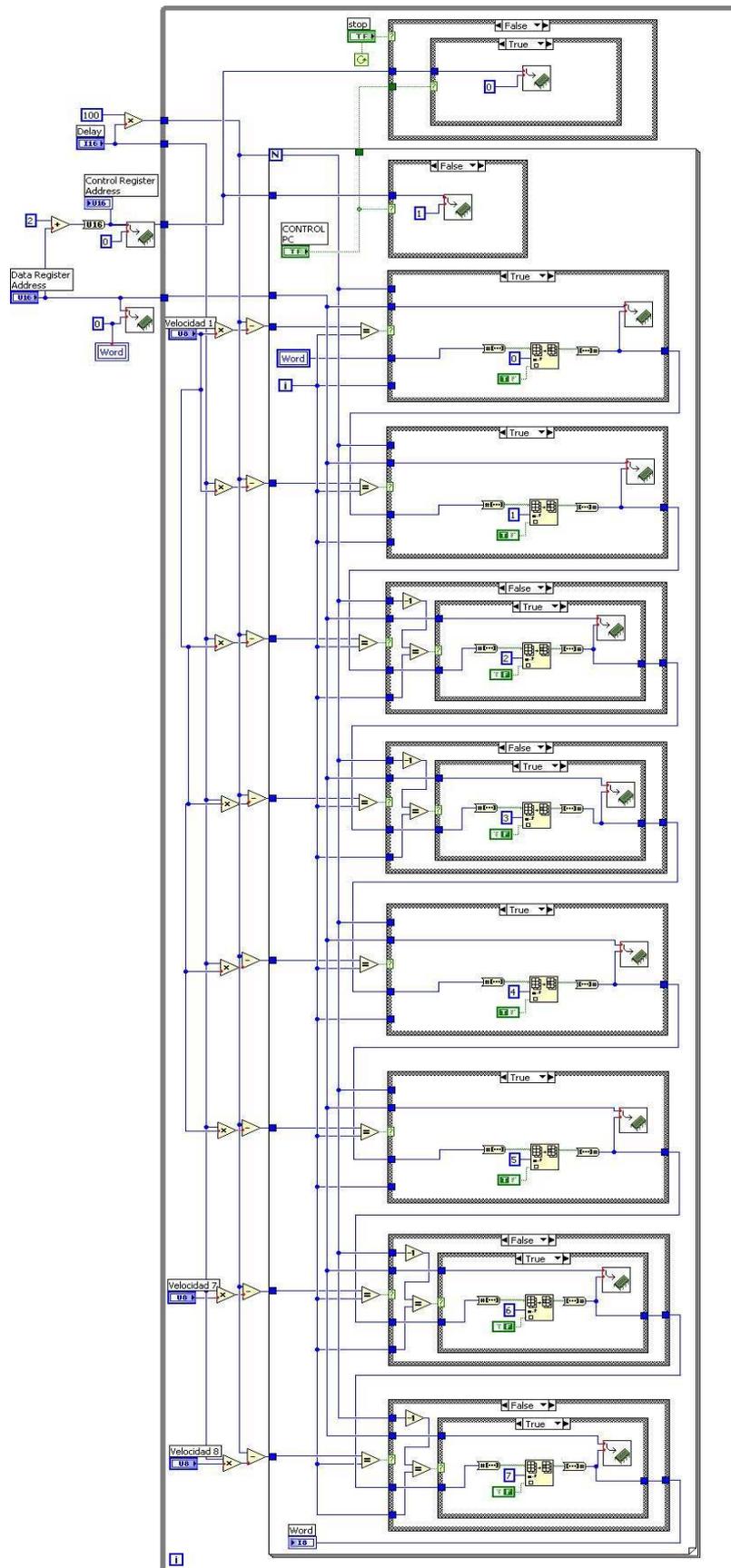


Figura 5.2: Diagrama de bloques

Apéndice II

El programa realizado en Matlab para procesar digitalmente las imágenes adquiridas con la cámara rápida filtra cada imagen y elimina los gradientes de luz. De este modo, se binariza cada imagen y se encuentran los bordes del filamento. Una vez detectada su forma, se divide en segmentos y se calcula su diámetro promedio en cada imagen.

```
1 clear all;
2 close all;
3 clc;
4
5 path='/media/VERBATIM/T E S I S   TODO/38_14 (monicaaps)/3_8/S10/
   PROCESADOS S10 38/s10_v94_3_ij/';
6 fotos=dir([path '*.tif']);
7 im2=[];
8 j=0;
9
10 %% %ciclo para todas las fotos de la serie a procesar
11 for i=1:1:600
12     j=j+1;
13     imt=imread([path fotos(i).name]);
14     %% %se calcula el complemento de cada imagen
15     imt=imcomplement(imt);
16     imt=imt(1:210,1:190);
17     %% %se calcula el promedio del complemento de cada imagen
18     imr=mean(imt,2);
19     for k=1:size(imt,2)
20         %% %se eliminan los gradientes de luz de cada imagen
21         imt(:,k)=imt(:,k)-uint8(imr);
22     end
23     im2=cat(3,im2,imt);
24 end
25
26 clear imt
27 im1=mean(im2,3);
28 %% %filtro gaussiano utilizado
29 h=[0.25 0.5 0.25;
30     0.5 1.0 0.5;
```

```

31     0.25 0.5 0.25];
32 %% %se crea una estructura lineal
33 se90 = strel('line', 2, 90);
34 se45=strel('line',2,45);
35 se0 = strel('line', 2, 0);
36 %% %se crea una estructura de diamante
37 sed=strel('diamond',2);
38 %% %se crea una estructura de disco
39 sec=strel('disk',1);
40 im=zeros(size(im2,1),size(im2,2));
41 imk=zeros(size(im2,1),size(im2,2));
42 imp=zeros(size(im2,1),size(im2,2));
43
44 for i=1:size(im2,3)
45     im=double(im2(:, :, i))-im1;
46     %% %se filtra cada imagen
47     im=imfilter(im,h);
48     %% %se calcula el umbral de cada imagen mediante el operador Sobel
49     [junk threshold]=edge(im, 'sobel');
50     tr=0.85;
51     %% %se sintoniza el umbral y se encuentra el borde del filamento
52     con la funcion edge
53     im=edge(im, 'sobel', threshold*tr);
54     %% %se dilatan los bordes encontrados
55     im=imdilate(im, [se0 se45 se90], 'full');
56     im=imdilate(im, [se0 se45 se90], 'full');
57     %% %se rellenan los bordes para reproducir el filamento
58     im=imfill(im, 'holes');
59     %% %se reduce el grosor del filamento hasta llegar a su tamaño real
60     im=imerode(im, sed);
61     im=imerode(im, sec);
62     im=imerode(im, sec);
63     figure(1)
64     imshow(im)
65     hold on
66
67     % factor de escala de la serie (pix/mm)
68     scale=186/55;
69     %% %se divide el filamento en segmentos
70     [labeled, numObjects] = bwlabel(im,8);
71     graindata = regionprops(labeled, 'Area', 'Centroid', 'BoundingBox', '
        Orientation', 'MajorAxisLength', 'MinorAxisLength', 'Perimeter', '
        Image', 'Extrema', 'Eccentricity');
72     %% %se calculan las propiedades de cada segmento

```

```

73     k=0;
74     %% %tasa de adquisicion de la serie
75     fps=1000;
76     time(i)=i*(1/fps);
77     %% %En esta seccion, se calculan el area y ípermetro de los
       filamentos con una excentricidad  $e > 0.92$  y un area mayor a 500
       pixeles.
78     for j=1:length(graingroup)
79         if graingroup(j).Eccentricity > 0.92 && graingroup(j).Area > 500
80             k=k+1;
81             filamento=graingroup(j);
82             filarea(k)=filamento.Area;
83             filperimeter(k)=filamento.Perimeter;
84             meanwidth(k)=2*filarea(k)/filperimeter(k)/scale;
85         end
86     end
87     %% %se calcula el diametro promedio de cada imagen
88     meanwidthT(i)=mean(meanwidth);
89     if i >= 3
90         if meanwidthT(i) > (meanwidthT(i-1))
91             meanwidthT(i)=meanwidthT(i-1);
92         end
93         if meanwidthT(i) == meanwidthT(i-1) && meanwidthT(i) == meanwidthT(i
           -2)
94             for j=1:length(graingroup)
95                 if graingroup(j).Eccentricity > 0.95 && graingroup(j).Area
                   < 4000 && graingroup(j).Area > 500
96                     k=k+1;
97                     filamento=graingroup(j);
98                     filarea(k)=filamento.Area;
99                     filperimeter(k)=filamento.Perimeter;
100                    meanwidth(k)=2*filarea(k)/filperimeter(k)/scale;
101                end
102            end
103        end
104    end
105    %% %se realiza la grafica de la evolucion temporal del diametro
       promedio del filamento
106    figure(2)
107    plot(time(i), meanwidthT(i), 'ro')
108    set(gca, 'xscale', 'log')
109    hold on
110
111 end
112 close(1)

```

Bibliografía

- [1] W. Alexander, S. Rolland, S. Lee, and A. Shen. Vortical Interfaces Between Immiscible Fluids. *Phys. Fluids*, 16(9):12, 2004.
- [2] I. Asimov. *Words of Science and the History Behind Them*. Riverside Press, Cambridge, MA, USA, 1959.
- [3] D.R. Askeland and P.P. Phulé. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Editorial Thomson, México, D.F., 2004.
- [4] M. Birouk, B. Sarh, and I. Gökalp. An attempt to realize experimental isotropic turbulence at low Reynolds number. *Flow, Turbulence and Combustion*, 70:325–348, 2003.
- [5] B.J. Briscoe, C.J. Lawrence, and W.G.P. Mietus. A review of immiscible fluid mixing. *Advances in Colloid and Interface Science*, 81:1–17, 1999.
- [6] M. Chacha, S. Radev, L. Tadrist, and R. Occelli. Numerical treatment of the instability and the breakup of a liquid capillary column in a bounded immiscible phase. *Int. J. Multiphase Flow*, 23(2):337–395, 1997.
- [7] G. Coppola and A. Gomez. Experimental investigation on a turbulence generation system with high-blockage plates. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33:1037–1048, 2009.
- [8] I.P.D. DeSilva and H.J.S Fernando. Oscillating grids as a source of nearly isotropic turbulence. *Phys. Fluids*, 6:2455–2464, 1994.
- [9] T. Fallon and C.B. Rogers. Turbulence-induced preferential concentration of solid particles in microgravity conditions. *Exp. Fluids*, 33:233–241, 2002.
- [10] A. Frischknecht. Stability of cylindrical domains in phase-separating binary fluids in shear flow. *Phys. Rev.*, 58:3495–3514, 1998.
- [11] W.K. George. The decay of homogeneous isotropic turbulence. *Phys. Fluids*, 4(7):1492–1509, 1992.
- [12] C. Goepfert, J.L. Marié, Chareyron D., and M. Lance. Characterization of a system generating a homogeneous isotropic turbulence field by free synthetic jets. *Exp. Fluids*, 10, 2009.
- [13] A.Y. Gunawan, J. Molenaar, and Van de Ven A.A.F. In-phase and out-of-phase break-up of two immersed liquid threads under influence of surface tension. *E.J. of Mech B/Fluids*, 21:399–412, 2002.

- [14] A.Y. Gunawan, J. Molenaar, and Van de Ven A.A.F. Does shear flow stabilize an immersed thread? *E. J. of Mech B/Fluids*, 24:379–396, 2005.
- [15] J.F. Hernández Sánchez. Emulsificación de un líquido viscoso en agua. UNAM, 2007.
- [16] J.O. Hinze. *Turbulence*. McGraw Hill, NY, USA, 1959.
- [17] W. Hwang and J.K. Eaton. Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow. *Exp. in Fluids*, 36:444–454, 2004.
- [18] I.B. Ivanov. Effect of surface mobility on the dynamic behavior of thin liquid films. *Pure Appl. Chem.*, 52(5):1241–1262, 1980.
- [19] F. Leal-Calderón, V. Schmitt, and J. Bibette. *Emulsion Science, Basic Principles*. Springer, NY, USA, 2007.
- [20] S. Liu, J. Katz, and C. Meneveau. Evolution and modelling of subgrid scales during rapid straining of turbulence. *J. Fluid Mech.*, 387:281–320, 1999.
- [21] H. Luo and C. Pozrikidis. Numerical simulation of particle encapsulation due to liquid thread breakup. *Computers and Fluids*, 38:564–571, 2009.
- [22] F.E. Mancilla Ramos. Caracterización de un flujo turbulento en la producción de una emulsión. UNAM, 2009.
- [23] T.G. Mason and J. Bibette. Emulsification in Viscoelastic Media. *Phys. Rev. Lett*, 77(16):3481–3484, 1996.
- [24] J.A. Pathak and K.B. Migler. Droplet-string deformation and stability during microconfined shear flow. *Langmuir*, 19(21):8667–8674, 2003.
- [25] S.B. Pope. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, NY, USA, 2000.
- [26] L. Rayleigh. On the stability of liquid jets. *Proc. London Math. Soc.*, 10:4–18, 1878.
- [27] L. Rayleigh. On the instability of a cylinder of viscous liquid under the capillary force. *Phil. Mag.*, 34:145–154, 1892.
- [28] L.L. Schramm. *Emulsions, Foams, and Suspensions: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2005.
- [29] J. Sheng, H. Meng, and R.O. Fox. A large eddy PIV method for turbulence dissipation rate estimation. *Chemical Engineering Science*, 55:4423–4434, 2000.
- [30] K. Shinoda and H. Saito. The Stability of O/W Type Emulsions as a Function of Temperature and the HLB of Emulsifiers: The Emulsification by PIT Method. *J. Colloid Interface Science*, 30:258–263, 1969.
- [31] A. Srdic, H.J.S. Fernando, and L. Montenegro. Generation of nearly isotropic turbulence using two oscillating grids. *Exp. Fluids*, 20:395–397, 1996.
- [32] H. Tennekes and L.J. Lumley. *A First Course in Turbulence*. MIT Press, Cambridge, MA., 1972.

-
- [33] S. Tomotika. On the instability of a cylindrical thread of a viscous liquid by another viscous fluid. *Proc. Roy. Soc.*, 150:322–337, 1935.
- [34] M. Van Dyke. *An Album of Fluid Motion*. Parabolic Press, California, USA, 1982.
- [35] E.A. Variano, E. Bodenschatz, and E.A. Cowen. A random synthetic jet array driven turbulence tank. *Exp. Fluids*, 37:613–615, 2004.
- [36] E. Villiermaux and E.J. Hopfinger. Periodically arranged co-flowing jets. *J. Fluid Mech.*, 263:63–92, 1994.
- [37] M. Zlokarnik. *Stirring, Theory and Practice*. Wiley-VCH Verlag GMBH, Weinheim, Germany, 2001.

