



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ANALISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE  
EMULSIONES ACEITE-EN-AGUA (OW).**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN INGENIERIA MECANICA  
TERMOFLUIDOS**

**P R E S E N T A :**

**M. en I. EDUARDO MEDINA HERNANDEZ**

**TUTORES:**

**DR. ANSELMO CHAVEZ ARGÜELLES  
DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ**

2011





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

<b>Contenido</b>	<b>página</b>
<b>Prefacio</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>iv</b>
<b>Nomenclatura y palabras clave (keywords)</b>	<b>vi</b>
<b>Capítulo 1.- Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2.- Caracterización de sprays.</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo 3.- Análisis de mezcladores.</b>	<b>45</b>
<b>Capítulo 4.- Reología de emulsiones OW.</b>	<b>61</b>
<b>Capítulo 5.- Sprays de emulsiones OW.</b>	<b>77</b>
<b>Capítulo 6.- Conclusiones.</b>	<b>99</b>
<b>Referencias</b>	<b>103</b>
<b>Artículos e Informes generados relacionados con este trabajo</b>	<b>115</b>
<b>Gráficas, Figuras, y Fotografías adicionales</b>	<b>116</b>

## **Prefacio**

Este trabajo de tesis surge del interés personal de conocer y profundizar acerca del comportamiento de flujos multidispersos, particularmente las emulsiones, generado durante una estancia sabática en el Laboratorio de Sistemas de Combustión del Instituto Mexicano del Petróleo (LSC). El interés por combinar las diversas instalaciones del laboratorio y usar al mismo tiempo equipos sofisticados, me condujo al planteamiento de un proyecto, donde empezando de cero, y teniendo como premisa lograrlo con una mínima inversión, fuera útil a las actividades de desarrollo e investigación del laboratorio, y produjera aportaciones en este campo de conocimiento. Se planteó entonces un proyecto de investigación que al menos en concepto, era muy sencillo: estudiar los efectos que se producen en una emulsión aceite-en-agua (OW) a su paso por una boquilla de atomización y spray producido, y al mismo tiempo, los efectos causados sobre el éste, por la misma emulsión (OW). Sencillo, porque se contaban nominalmente con todos los elementos, esto es, conocimiento y técnicas para producir emulsiones, equipo de laboratorio para determinar las características de las mismas, instalaciones para la experimentación con sprays, equipo sofisticado para los análisis, y finalmente personal altamente capacitado en esos temas. Siendo de gran relevancia para el LSC el desarrollo de combustibles alternos, se ha trabajado en el estudio y producción de emulsiones de residuos de vacío en agua, generándose el conocimiento necesario que culminó con el diseño e instalación de una planta piloto para fabricar esas emulsiones con la intención de estudiar todas las etapas relacionadas con su uso como combustible: almacenamiento, manejo, inyección y quemado, incluyendo las implicaciones de tipo ambiental. Entonces, aún cuando es de gran interés para el LSC llegar a determinar los efectos producidos por el paso de una emulsión aceite en agua -producida a partir de residuos de vacío- al ser manejada a través de una boquilla de atomización con el propósito de quemarla, estos trabajos no habían sido abordados de ninguna forma porque no se deseaba (en realidad no se podía) simplemente usar la emulsión y realizar los experimentos, por las implicaciones potencialmente negativas, esto es, la posible separación del residuo, con las consecuencias negativas sobre las instalaciones utilizadas. Al no existir una emulsión que permitiera utilizar las instalaciones sin los problemas asociados a la mencionada, fue necesario realizar una tarea más amplia, es decir, desde conocer la mecánica de fabricación de emulsiones, caracterizarlas con el objetivo particular de modificar o ajustarlas para lograr características concretas, la definición de la emulsión modelo, la producción de la misma en cantidades suficientes para utilizarse en las instalaciones en la fase experimental, hasta el desarrollo de la fase experimental y el análisis posterior de los resultados. Inicialmente, algunas actividades parecían desligadas por lo que tenía una idea diferente de lo que debería reportar en esta tesis, sin embargo, las sugerencias de mis tutores me hicieron darle reconocimiento a cada parte del trabajo realizado. El trabajo cubre diversos temas envueltos en dos temas centrales, las emulsiones, y los sprays, y está organizado en 6 capítulos. En el capítulo 1, se discuten en lo general los antecedentes del proyecto, definiéndose objetivos y alcances, junto con la revisión bibliográfica acerca de los temas involucrados; en el capítulo 2, se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de sprays utilizando para ello diversas técnicas; en el capítulo 3, se ofrece la información obtenida para la definición de los parámetros básicos del sistema de mezclado a utilizarse para la fabricación de la emulsión modelo; en el capítulo 4, se discuten los resultados del comportamiento y la producción de emulsiones; en el capítulo 5, se trata el tema más relevante de este trabajo: la caracterización de sprays de emulsiones OW; y finalmente, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones generales del

trabajo de tesis. Los capítulos 2 al 5 corresponden con el desarrollo secuencial del proyecto de investigación, por lo que se mencionan también como fases del proyecto doctoral: fase 1, caracterización de sprays, fase 2, análisis de mezcladores, fase 3, reología de emulsiones, fase 4, producción de emulsiones y fase 5, desarrollo experimental de sprays de emulsiones.

Espero que los resultados obtenidos sean de utilidad, primordialmente para la institución que me dio la facilidad de trabajar y utilizar, en un amplio sentido, sus instalaciones, a la que le agradezco asimismo todo el apoyo humano y material: al Laboratorio de Sistemas de Combustión del Instituto Mexicano del Petróleo

No puedo dejar de pensar que este trabajo se logró terminar gracias sobre todo a la parte humana, sin el apoyo del personal del Laboratorio, de ninguna manera hubiera llegado al otro lado de la orilla, el hecho de que cada elemento del grupo me apoyó de una u otra forma, ya sea con apoyo directo, aportando ideas, discutiendo y comentando resultados, sugiriendo actividades, en realidad me sentí como de casa, por eso, deseo manifestar mi agradecimiento a cada uno de ellos: Ramón Bolado, Rogelio Escalera, Anselmo Chávez, Mario Ramírez, Martha García, René Ocampo, Zoili Tapia, Uriel González, Andrés Ceballos, Jaime Mora, David López, Adriana Wong, Claudio Santos, Consuelo Rendón, Beatriz Lara, y Joaquín León -con todo su grupo técnico-. También, va mi agradecimiento a los compañeros del departamento, quienes siempre me estuvieron alentando y presionando para que culminara este trabajo, particularmente, a los miembros de mi comité y jurado, Francisco Solorio, Federico Méndez, Jaime Cervantes y Oscar Bautista..

Asimismo, agradezco el apoyo económico otorgado por la UNAM, a través del programa PASPA de la DGAPA.

**Eduardo Medina Hernández, marzo 2011.**

---

## Resumen

El conocimiento de las características reológicas y comportamiento de emulsiones en diversas circunstancias y condiciones, es de gran importancia en una gran variedad de aplicaciones tecnológicas que cubren un amplio rango, para resolver los problemas que se presentan, y definir criterios de diseño o parámetros de ajuste para la optimización del sistema o proceso. Esta tesis se centró en el interés por conocer el comportamiento de emulsiones aceite-en-agua (OW) que pudieran utilizarse directamente como combustibles alternos, por lo cual, además del interés por caracterizarlas reológicamente, el objetivo principal fue el de estudiar su comportamiento al utilizarlas en una boquilla de atomización para conocer el efecto que se produce en un spray de emulsión en cuanto a morfología, distribución de tamaños de gota y en especial, discernir si ésta mantiene su integridad, sufre cambios, o se rompe al paso por el atomizador, estableciéndose las condiciones bajo las cuales se da su rompimiento.

El trabajo de investigación se resume en cuatro fases agrupadas secuencialmente y que arrojan resultados diversos que confluyen en los resultados globales. En la primera fase, caracterización de sprays, con el fin de caracterizar una boquilla de atomización para contar con detalles sobre su comportamiento, y sobre todo, con una base de datos para contrastar resultados posteriores, se caracterizó la boquilla utilizando anemometría de fase Doppler (PDA), y complementado la información con velocimetría de imágenes de partículas (PIV) en dos y tres dimensiones (2D y 3D); como resultado se obtuvo información detallada de la estructura macro y microscópica del spray, obteniéndose, los perfiles de velocidad a diferentes posiciones aguas abajo de la descarga, valores RMS, junto con la información detallada de los diámetros  $D_{10}$  y  $D_{32}$ . En la segunda fase, se analizó con detalle el comportamiento de un sistema de mezcladores con el fin de obtener parámetros básicos de diseño que permitieran definir las características de la geometría más adecuada para la etapa de producción de la emulsión modelo, nuevamente, se utilizó PIV en 2D para la obtención de los datos buscados. Los resultados de la visualización y medición muestran los detalles del comportamiento en función del paso  $H/D$  y del Reynolds ( $Re$ ) identificándose las condiciones buscadas. En la tercera fase, se realizó la fabricación de emulsiones (OW) en laboratorio, identificándose los parámetros básicos para la generar las emulsiones deseadas y caracterizándolas reológicamente en función de la temperatura, composición, y distribución de tamaños de gotas (DTG), todo lo anterior, para concretar las características deseadas de la emulsión modelo para la última fase. En la cuarta fase, el objetivo fue la producción de las cantidades necesarias de la emulsión modelo (OW) tomando como base los datos obtenidos y las características definidas en la fase anterior, y finalmente, en la fase 5 se desarrolló el objetivo principal del trabajo de investigación, la caracterización de la emulsión modelo al paso por una boquilla de atomización con la intención de dilucidar los efectos producidos al modificar las condiciones de operación, en particular, el posible rompimiento de la emulsión; se recurrió nuevamente a técnicas ópticas para la caracterización: la fotografía digital y la difractometría, la segunda, tanto para el análisis del spray, como para el de las muestras de emulsión OW colectadas aguas abajo del mismo.

El proyecto se sustentó sobre las siguientes preguntas: ¿la emulsión produce efectos sobre un spray en cuanto a forma y DTG en contraste con uno de aceite de características semejantes?, y particularmente, ¿la emulsión sufre cambios o incluso se destruye cuando pasa por la boquilla de atomización? Estas son las principales respuestas de este trabajo.

-Distribución espacial. Aún cuando los resultados cualitativos son iguales, se puede encontrar una clara diferencia entre ambos sprays, el resultado neto es que el de emulsión se abre más que el convencional lo que implica un comportamiento equivalente a una mayor  $r_p$  o una menor temperatura, es decir, una condición más desfavorable. Se utilizó el parámetro  $r_p$  como la variable independiente en todo el análisis.

-Tamaños de gotas. El análisis de DTG confirma que los tamaños en un gran rango son mayores y ocupan mayor espacio que lo del spray de referencia.

-Comportamiento con  $r_p$ . Se cuantificaron diferencias significativas del  $D_{32}$ : para valores cercanos a  $r_p = 1.0$ , los valores son prácticamente iguales, incrementándose cuadráticamente a favor de la emulsión, con una diferencia de 40% para  $r_p \sim 1.50$ .

-Morfología del spray. Como resultado natural si se liga con los anteriores, el ángulo del spray de emulsión es más grande que el del spray de referencia, variando cuadráticamente pero con un valor máximo 40% mayor para el de emulsión cuando  $r_p \sim 1.22$  y decayendo para  $r_p$  mayores.

-Efecto de la emulsión sobre el spray. Como se ha enlistado, la emulsión produce cambios cuantificables sobre el spray, y al mismo tiempo, éste produce cambios sobre la emulsión. De los análisis realizados sobre ésta después del paso por la boquilla, se observó que en el rango  $\sim 1.22 < r_p = 1.50$ , la emulsión sufre cambios marginales en el extremo, pero a partir de ese valor, se produce un cambio en la DTG de la emulsión, desplazándose las DTG hacia la izquierda, perdiéndose sucesivamente tamaños de gota grandes. Con el fin de ver si estos cambios producen algún efecto sobre la DTG del spray, no se notó que exista un efecto cuantificable sobre ésta, sin embargo, sí se observó que en las DTG de la emulsión se “producen” sucesivamente gotas de tamaño más pequeño con la disminución de  $r_p$ . Como esto es improbable, se puede concluir que se debe a la separación de gotas más grandes producidas por el efecto de floculación. Las emulsiones que se analizaron después de estar un tiempo significativo en reposo muestran el mismo efecto, la aparición de gotas más pequeñas que en su estado original, lo que confirma la aseveración anterior.

-Destrucción. Siendo una de las preguntas más relevantes de este trabajo, las observaciones y evidencias muestran que existe destrucción, aunque es mínima en un rango amplio de  $r_p$ , pero a partir de un valor crítico cercano a  $r_p = 1.22$ , ésta crece rápidamente para valores más reducidos, notándose que pudiera existir destrucción total de la emulsión antes de llegar a  $r_p = 1.0$ .

## Nomenclatura

<b>a</b>	coeficiente de ponderación, fracción, [adimensional]
<b>b</b>	coeficiente de ponderación, fracción, [adimensional]
<b>b</b>	longitud lateral para $u = u_{m\acute{a}x}/2$ , [mm]
<b>c</b>	coeficiente de ponderación, fracción, [adimensional]
<b>C<sub>q</sub></b>	coeficiente de gasto = $Q/\Omega D^3$ , (adimensional)
<b>C<sub>u</sub></b>	coeficiente de velocidad radial = $u/\Omega D$ [adimensional]
<b>C<sub>v</sub></b>	coeficiente de velocidad axial = $v/\Omega D$ [adimensional]
<b>C<sub>v</sub></b>	coeficiente de velocidad total = $V/\Omega D$ [adimensional]
<b>D</b>	diámetro del rotor, [m]
<b>D*</b>	diámetro adimensional = $D_p/D_{32}$ , [adimensional]
<b>D<sub>0</sub></b>	diámetro del orificio de la boquilla, [mm]
<b>D<sub>0.x</sub></b>	diámetro de gotas correspondiente al x0% del volumen de la fase dispersa, [ $\mu\text{m}$ ]
<b>D<sub>10</sub></b>	diámetro promedio, [ $\mu\text{m}$ ]
<b>D<sub>32</sub></b>	diámetro Sáuter, [ $\mu\text{m}$ ]
<b>D<sub>c</sub></b>	diámetro de cámara, [m]
<b>D<sub>c</sub>*</b>	relación de diámetros = $D/D_c$ , [adimensional]
<b>D<sub>p</sub></b>	diámetro ponderado, [ $\mu\text{m}$ ]
<b>h</b>	ancho de la paleta, [m]
<b>H</b>	distancia entre rotores, [m]
<b>L</b>	longitud axial, [mm]
<b>Oh</b>	número de Ohnesorge = $\mu/(\rho L_c)^{0.5}$ , [adimensional]
<b>p</b>	presión, [bar] (absoluta)
<b>P*</b>	paso = $H/D$ , [adimensional]
<b>Q</b>	gasto a través del mezclador, [m <sup>3</sup> /s]
<b>R</b>	relación de aspecto = $h/D$ , [adimensional]
<b>Re<sub>D</sub></b>	número de Reynolds = $\Omega D^2/\nu$ , [adimensional]
<b>Re<sub>Lc</sub></b>	número de Reynolds = $uL_c/\nu$ , [adimensional]
<b>r<sub>p</sub></b>	relación de presiones = $p_v/p_{\text{aire}}$ , [adimensional]
<b>S</b>	"span" = $(D_{0.9} - D_{0.1})/D_{0.5}$ , [adimensional]
<b>T</b>	temperatura, [°C]
<b>u</b>	velocidad del fluido en la dirección x, [m/s]
<b>u<sub>x</sub></b>	velocidad del fluido en el extremo de la paleta en la dirección x, [m/s]
<b>V</b>	módulo de la velocidad total, [m/s]
<b>v</b>	velocidad del flujo en la dirección y ó z, [m/s]
<b>W</b>	de contenido de agua, % en peso [%]
<b>We<sub>Lc</sub></b>	número de Weber = $\rho_a u^2 L_c / \sigma$ , [adimensional]
Letras griegas	
$\dot{\gamma}^{-1}$	rapidez de deformación (velocidad de corte), [s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\gamma}_0^{-1}$	rapidez de deformación (velocidad de corte), [s <sup>-1</sup> ]
	ángulo del spray, [°]
	viscosidad dinámica, [Pa·s]
	densidad, [kg/m <sup>3</sup> ]
	tensión superficial, [N/m]
	esfuerzo cortante, [N/m <sup>2</sup> ]



$\Omega$  régimen de giro, [ $s^{-1}$ ]

#### Subíndices

a referido al aire  
c valor característico  
e emulsión  
g gas  
i dirección i (x = transversal al flujo principal, y = vertical, z = longitudinal)  
l líquido  
o aceite  
r coordenada radial, condición de referencia  
s spray  
t emulsión (tanque)

#### Abreviaturas

xD x dimensiones (2D, 3D)  
ALE Arbitrary Lagrangian Eulerian  
CCD Charge Coupled Device (dispositivo de carga acoplado)  
CFD Computational Fluid Dynamics  
CFM Computational Fluid Mixing  
DNS Direct Numerical Simulation  
DTG Distribución de Tamaños de Gota  
HSC High Speed Camera  
HSV High Speed Video  
HIPRE High Internal Phase Emulsion  
ILIDS Interferometric Laser Imaging Droplet Sizing  
IPR Internal phase relationship  
ISO VG International Standard Organization Viscosity Grade  
LES Large Eddy Simulation  
LDA Laser Doppler Anemometry  
LDV Laser Doppler Velocimetry  
MTS Markovianised Two-Scale  
OW emulsión aceite-en-agua  
OWO emulsión aceite-en-agua-en-aceite  
PDA Phase Doppler Anemometer  
PIV Particle Image Velocimetry  
PLIF Planar Laser Induced Florescence  
RANS Reynolds Averaged Navier Stokes  
RSM Reynolds Stress Model  
SMD Sauter mean diameter  
SPIV Stereo Particle Image Velocimetry (=PIV-3D)  
TSDIA Two-Scale Direct Interaction Approximation  
VLES Very Large Eddy Simulation  
WO emulsión agua-en-aceite  
WOW emulsión agua-en-aceite-en-agua

Palabras Clave: Emulsiones, emulsiones aceite-en-agua, sprays, diámetro Sáuter, PIV, PDA, difractor láser.

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

El estudio de la combustión en quemadores es de vital importancia en diversos campos tecnológicos en virtud de las implicaciones al incrementar su eficiencia, sea en el ahorro de combustibles, en la reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos, coadyuvando a mitigar el calentamiento global, en la estabilidad de la combustión, al incrementar la duración y confiabilidad de sus componentes, entre otras ventajas. Es un campo en constante movimiento que involucra diversas aplicaciones industriales, desde todo tipo de hornos y quemadores industriales para calentar diversos materiales, los quemadores de turbinas de gas y los asociados a la industria aeroespacial, hasta los grandes quemadores asociados a la producción de energía eléctrica mediante el quemado de combustibles fósiles. En este punto, el desarrollo de los dispositivos se liga a la materia prima, los combustibles fósiles, y éstos definen líneas o cambios de diseño causadas de manera natural por el recurso disponible; en el caso de países como el nuestro, el hecho de que la calidad del petróleo crudo nacional, tenga una tendencia clara al agotamiento en un futuro cercano de los combustibles de mejor calidad, quedando por explotar recursos que entran en la categoría de crudos pesados, y aún más, en la de crudos extra-pesados, crea la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas para la producción, transporte, y uso de esos productos, las dos primeras ligadas a PEMEX, y la última, a la aplicación, sea en el proceso de refinación que involucra de nuevo a PEMEX, o a la combustión en plantas y procesos industriales. Siguiendo el trabajo desarrollado en otros países, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), han estado interesados en desarrollar alternativas que consideren estos aspectos, por lo que han generado infraestructura para mejorar los procesos de combustión en las plantas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el caso del IIE, y para resolver y desarrollar tecnología a utilizarse en el crudo nacional en el caso del IMP. Además de la línea general de combustión, estas instituciones comparten el interés por desarrollar tecnología asociada al uso de los crudos extrapesados, en particular, el desarrollo de emulsiones de petróleo crudo en agua. Adicionalmente, en el caso del IMP, se hacen trabajos de diverso tipo con el fin de mejorar, ajustar o producir nuevos esquemas para el uso de los combustibles que produce PEMEX mediante especificaciones, patentes, nuevos procesos, nuevos aditivos, y nuevos combustibles. En el Laboratorio de Sistemas de Combustión (LSC) del IMP, se ha estado desarrollando infraestructura para el análisis y prueba de combustibles alternos contando con las instalaciones, la instrumentación y equipo de medición, y el personal para llevar a cabo estas actividades. En particular, se ha trabajado en diversas líneas que se dirigen a demostrar la factibilidad e implicaciones técnicas del uso de combustibles alternos, siendo uno de ellos las emulsiones de crudo pesado en agua, desde la etapa de producción y caracterización de las mismas, el transporte, su atomización, hasta su quemado en condiciones controladas, en equipos diseñados para ello, para monitorear *in situ*, su comportamiento durante la combustión y el impacto al medio ambiente producido. En resumen, el IMP cuenta con las instalaciones y el interés para desarrollar actividades relativas al análisis del comportamiento de sprays de emulsiones, entre otros problemas. Adicionalmente, las muy diversas aplicaciones de los sprays y de las emulsiones, incluyendo los sprays de emulsiones, hacen que este sea un tema de un gran interés general y así lo demuestran los trabajos de investigación realizados a la fecha. Se pueden

mencionar como disciplinas, industrias o aplicaciones ligadas al tema: farmacéutica, biomedicina, hogar, sanitaria, alimentos, agroindustria, metalmecánica, seguridad, impresoras de inyección de tinta, combustión en motores de combustión interna y turbo-reactores, combustión en plantas de proceso y en la generación de energía eléctrica, entre otras.

## **1.2. Motivación.**

Las principales motivaciones para emprender este trabajo de investigación podrían resumirse en la coloquial frase “estar en el lugar y el momento adecuado”. Antes de iniciar este proyecto, tuve la oportunidad de colaborar en el LSC-IMP en una estancia sabática durante la que trabajé una línea en particular, sin embargo, más allá de eso, había una gran actividad con participación del personal de base, personal adicional, y alumnos becados ya sea en servicio social, prácticas profesionales o realizando su tesis de licenciatura, además de un par de los miembros del personal de IMP, realizando sus tesis de maestría. Estaba en pleno la realización de la instalación y puesta en marcha de la mayor parte de la infraestructura del LSC, con algunos equipos inclusive en la etapa previa de su recepción y puesta en operación, con la capacitación correspondiente por parte del fabricante, como fue el caso del equipo de velocimetría de imágenes de partículas que fue ampliado de 2 a 3 dimensiones, con la incorporación de la opción de fluorescencia inducida por láser (PLIF) para líquidos, y el reacondicionamiento del anemómetro de fase Doppler (PDA). Sumando estos equipos a las capacidades existentes como los equipos de difracción para análisis de sprays (Malvern RTSizer), y de determinación de tamaños de gotas de muestras de emulsiones o de partículas sólidas (Malvern MasterSizer), las cámaras de combustión, una para combustibles líquidos y otra para gases y una más, para el quemado de gotas individuales, los bancos de flujo para experimentación de boquillas de sprays, la cámara rápida, y el reómetro Haake, entre otros, dan como resultado una gran infraestructura para el desarrollo de proyectos, sobre todo al agregar la gran capacidad y experiencia del personal base, altamente calificado en esos temas. Sumando a esto los retos tecnológicos que se desarrollaban y las actividades y proyectos por concretar, la posibilidad de plantear una colaboración mediante una propuesta de proyecto de investigación doctoral que pudiera sumar a la solución de problemas tecnológicos importantes fue evidentemente bienvenida. En resumen, tenía al alcance de mi mano equipo con el que cualquier institución como la UNAM desearía contar (y cuenta al menos parcialmente en algunos de sus Centros y Facultades), y la oportunidad de aportar en este campo de conocimiento, por lo que sumando estos conceptos, se definió la propuesta de trabajo de investigación que culminó con esta tesis.

## **1.3. Objetivos.**

Con base en las actividades del LSC, se planteó el objetivo de trabajar y avanzar particularmente en la caracterización de sprays de emulsiones, utilizando emulsiones modelo, en virtud del elevado potencial de aplicación en la industria y aprovechando la gran infraestructura de la institución receptora (LSC-IMP). Para ello, se reconoció como objetivo general, el desarrollar de manera estructurada, todas las etapas que condujeran a la caracterización de sprays de emulsiones OW, desde el conocimiento necesario para su fabricación, que incluye mediante su caracterización, identificar los parámetros de diseño de los elementos para la producción de emulsiones OW; la definición de la emulsión modelo mediante el control de sus características en cuanto a tamaño y distribución de

tamaños de gotas (DTG), su viscosidad, su comportamiento con la temperatura y su estabilidad; la producción del lote suficiente de emulsión modelo; el desarrollo de las bases de datos con los que se pudiera contrastar o complementar el comportamiento de los sprays de emulsión, hasta la caracterización como objetivo principal, del comportamiento de la emulsión modelo al paso por una boquilla de atomización y el impacto del paso de la emulsión sobre su integridad.

#### **1.4 Alcances.**

Caracterizar la emulsión OW modelo producida antes y después del paso por una boquilla de atomización, caracterizando asimismo, los sprays de emulsión en términos de su distribución espacial en función de la variable de control seleccionada, permitiendo establecer, si es que existen, las diferencias asociadas a ella, en cuanto a morfología del spray, la distribución de tamaños de gotas del spray y de la emulsión, y muy en particular, las condiciones bajo las que se produce su destrucción, si es que ésta se lleva a cabo.

#### **1.5 Estado del Arte.**

La identificación de las tareas descritas, generó la necesidad de revisar campos diversos de investigación científica y/o desarrollo tecnológico: el comportamiento de sprays, las técnicas experimentales utilizadas así como los esquemas para el modelado, la simulación numérica y experimental de esquemas de mezcladores, elemento básico en la producción de emulsiones, los trabajos realizados en el campo de las emulsiones, desde su producción, reología, estabilidad, componentes, destrucción (desemulsificación), y de acuerdo a los objetivos y alcances, los estudios acerca de las aplicaciones de las emulsiones, en particular, aquellas que están asociadas a sprays.

Se presenta entonces una revisión de estado del arte que abarca esos diversos temas, por lo que inicialmente se separaron los trabajos relacionados con esta investigación en 4 líneas de conocimiento o investigación: los sprays y técnicas experimentales asociadas a ellos, los trabajos sobre tanques mezcladores, los ligados a la caracterización de emulsiones, incluyendo las principales líneas de aplicación de éstas, y finalmente, los trabajos que integran los anteriores, es decir, los que abordan el tema de sprays de emulsiones. Se discuten por separado cada una de estas líneas aun cuando existan traslapes entre ellas, con frecuencia se mezclan estos tópicos en las investigaciones comentadas. Las líneas de investigación manejadas se ajustan en gran medida a las fases de este proyecto reportadas en los capítulos 2 al 5, respectivamente. Por organización del trabajo realizado, se definió aquí una estrategia esencialmente secuencial aun cuando de manera natural algunas actividades se llevaron a cabo en paralelo. Agrupando los trabajos, se tiene un total de 185 artículos referenciados, de los cuales, 49 corresponden al tema de sprays[1-49] (capítulo 2), 19 sobre técnicas experimentales[50-68] (capítulo 2), 25 sobre mezcladores[69-93] (capítulo 3), 60 sobre emulsiones que comprenden fundamentalmente caracterización reológica[94-153] (capítulo 4), 15 sobre aplicaciones de emulsiones[154-168] (capítulos 4 y 5), y 17 sobre sprays de emulsiones[169-185] (capítulo 5). En la organización de las referencias, se tomó en primer lugar el criterio de la línea de investigación, después la fecha de publicación, empezando por las más antiguas, luego el nombre del primer autor, y finalmente su relevancia, en cuanto a la influencia relativa sobre este trabajo, la lista incluye trabajos recientes principalmente. Siendo la revisión bibliográfica una actividad dinámica a lo largo de este proyecto, se comenta que aunque el desarrollo de las actividades experimentales se concluyó a mediados de febrero del 2009, naturalmente la revisión no

concluyó ahí, de hecho, en este período se incrementó aproximadamente en un 65%; ese total incluye la actualización de la lista anterior y en particular, los trabajos publicados en los años 2009 y 2010. De este período, se incluyen 11 trabajos sobre sprays y técnicas experimentales (16.2%), 1 de mezcladores (4%), 14 de emulsiones y aplicaciones de emulsiones (18.7%), y 5 de sprays de emulsiones (29.4%), todos los porcentajes anteriores, del total de trabajos de cada tema. En el caso de las referencias de sprays de emulsiones, las de los años 2009-2010, representan un incremento del 41.7% respecto de las anteriores.

### 1.5.1. Sprays.

El uso de sprays en una gran diversidad de aplicaciones, *e.g.*, usos en medicina, en aspersión de insecticidas, en la industria metalmecánica, en la ingeniería de alimentos, la agroindustria, en impresoras de inyección de tinta, en la combustión en motores de combustión interna y turbo-reactores, en la combustión en plantas de proceso y en la generación de energía eléctrica, entre otras, da como resultado el gran interés por conocer con detalle el comportamiento de las boquillas de atomización para gran variedad de condiciones, sea para ajustar o determinar condiciones óptimas de diseño. La caracterización experimental de sprays y gotas, se sigue estudiando con diversos métodos, particularmente los métodos ópticos asociados al uso de un haz de luz láser como es el caso del empleo de PDA [3, 9, 13, 15, 18, 22, 28, 29, 34, 35, 36, 38, 39, 41, 42, 45, 49, 61, 62, 63], PIV [5, 7, 25, 41, 43, 50, 51, 52, 53, 54, 60, 63] y PLIF [12, 17, 24, 44, 47, 68], la difracción de acuerdo a la teoría de Lorenz-Mie [4, 8, 24, 38], de “patternadores” [6, 8, 45], “shadowgraph” [16, 37], y también, con el uso de cámaras CCD [11, 29, 35, 39, 42], cámaras de alta velocidad HSC [20, 27, 31, 37] y cámaras de video ultra rápidas HSV [33]. Además de servir directamente en el diseño, la información experimental obtenida ayuda a mejorar los modelos matemáticos que se utilizan en la predicción, en esquemas completos donde se desean contrastar resultados con diferentes técnicas, como en el trabajo numérico experimental de quemadores incluyendo diversos esquemas de análisis ALE, TSDIA, MTS, usando el código NastComb con VLES, y complementado con experimentos con PDA, LDA, PIV de Pittaluga y Traverso [55]; analizando el rompimiento de gotas en chorros de diámetro pequeño en una corriente amplia de gas a alta velocidad, aplicando un esquema de rompimiento por inestabilidad Rayleigh-Taylor, Varga et al. [19]; en métodos de cálculo para alimentar las características específicas de combustibles pesados en códigos de CFD con el fin de mejorar las predicciones numéricas de este tipo de sprays, como Takei et al. [21]; utilizándose con frecuencia las funciones de distribución de gotas, *e.g.* Beck y Watkins [23]. La simulación de combustibles pesados en los procesos de combustión es una aplicación muy común en una gran cantidad de industrias, por lo que conocer el comportamiento de las macro- y micro- estructuras de un spray es de gran relevancia ya que se pueden producir cambios muy significativos en la combustión causados por el tamaño y distribución de gotas Loth [26] y Golovitchev y Corcione [32]. Entonces, su conocimiento es relevante para mejorar y ayudar al diseño, o cuando se desean modificar las características de una boquilla de atomización, como es el caso de esta investigación. En muchos casos, se utilizan esquemas combinados de trabajo experimental con el uso de códigos computacionales como KIVA-3V2, como es el caso de Xiao y Zhang [31], los que adicionalmente usaron modelos de ruptura KH-RT, caracterizando sprays de diesel y LPG. Otros ejemplos de este tipo de análisis son los realizados por Park et al. [41, 42]; para validar modelos en el caso de chorros viscosos y fluidos no newtonianos, como Aliseda et al. [36], en sprays utilizados en la industria farmacéutica. En cuanto a trabajos muy

recientes sobre simulación, Rigopoulos [46] hace una revisión completa sobre el uso de modelos lagrangianos para cada partícula o mediante el uso de ecuaciones de distribución de probabilidad. Se busca determinar los límites en el uso de PBE (population balance equation) que es un procedimiento estadístico que postula una distribución espacial y temporal de partículas, en gran variedad de flujos polidispersos incluidos los sprays, encontrando las ligas con los esquemas lagrangianos y de fluidos múltiples. Desjardins y Pitsch [48], realizaron un análisis numérico de los procesos que llevan a la atomización de un líquido. El chorro plano se simula para varios  $Re$  y  $We$  de donde se extraen las características detalladas necesarias en LES. La deformación temprana de la interfaz es provocada por los “eddies” turbulentos que llevan suficiente energía cinética para vencer a las fuerzas de tensión superficial, entonces las protuberancias se alargan y forman ligamentos que se rompen de acuerdo a la teoría de Rayleigh o debido a fuerzas aerodinámicas.

En cuanto a trabajo experimental, González [3] y Lacoste et al. [61] han utilizado -como muchos más- la técnica del PDA para el análisis transitorio del spray de un inyector de combustible diesel en motores de combustión interna. Porcheron et al. [9], utilizando PDA, estudiaron el efecto que tiene el cambio de densidad del aire en un esquema coaxial y el efecto amplificador de la relación  $\rho_g/\rho_a$  en el rompimiento del chorro. Pikkula et al. [11], analizaron los efectos del tamaño de gotas y densidad de una spray criogénico sobre la remoción de calor utilizando diversas boquillas, encontrando una relación no lineal entre la remoción de calor de las boquillas y los parámetros mencionados, entre otras cosas se vio que la remoción es mucho más importante durante el periodo de spray que durante el tiempo de residencia criogénico sobre la superficie. Timm et al. [13], efectuaron un estudio utilizando PDA y cámaras de alta velocidad para determinar los efectos en las características del spray causados por el tipo de combustible, su temperatura y la presión. Se encontró que el tamaño de las gotas de combustible está influenciado por la presión y la temperatura. El incremento en la presión en el sistema de combustible disminuye el tamaño de gota para todos los combustibles analizados. La visualización con alta velocidad de los patrones de flujo confirmó los resultados obtenidos con PDA. Stelter et al. [14] estudiaron el comportamiento de sprays de fluidos viscoelásticos. El uso de PDA se ha utilizado para conocer la características de nuevos diseños de inyectores, en este caso un inyector envuelto en aire (“air-shrouded injector”) con el fin de mejorar el comportamiento disminuyendo la emisión de hidrocarburos pesados generados por la no uniformidad en las gotas de un spray y un mezclado insuficiente, Kim et al. [15]. En un esquema muy completo y práctico, Ho [18], estudió los sprays usados en la supresión de incendios, mediante visualización de flujos y la medición de tamaños de partículas para examinar el proceso inicial del chorro y la atomización primaria. Aún ligeros cambios en el diseño de un atomizador pueden lograr efectos importantes en el comportamiento, por lo que el uso de PDA es una clara opción, como en el caso del trabajo de Yang et al. [22] donde se buscaba el efecto de la configuración de canales en micro sprays, en un contexto muy similar al del presente trabajo. Davis y Disimile [63], trabajando con sprays para extinción de fuego encontraron que los diámetros medidos de gotas mediante PDA son muy sensibles a la configuración óptica específica utilizada lo que puede ocasionar problemas en su determinación. Los resultados muestran que las mediciones de velocidad se afectan muy poco con los cambios de configuración, no así las mediciones de diámetro que pueden desviarse considerablemente. La configuración óptima puede ser muy difícil de elegir sin un conocimiento previo del rango de diámetro que va a ser medido. Se presenta entonces

una metodología experimental para determinar la configuración óptima que proporciona el menor desvío para un rango de diámetros. En el mismo sentido, Kapulla et al. [28] variaron los parámetros del equipo durante los experimentos para identificar la mejor combinación de ellos.

En cuanto al uso de otras técnicas experimentales o combinando la anterior con otras, Park et al. [29], usando PDA, y un sistema de cámara CCD y láser pulsado analizan las características de rompimiento y atomización de gotas monodispersas de diesel en una corriente de aire transversal, siendo el número de Weber el factor relevante estudiado por su efecto sobre las características del rompimiento de gotas. Aunque es claro y ventajoso el uso de PDA para conocer el tamaño y distribución de las gotas, el uso de otras técnicas que complementen la información también se usa a menudo, por ejemplo, Mun et al. [4], hicieron un estudio usando difracción, sobre el agregado de soluciones poliméricas en baja concentración para modificar las características de un spray, encontrando que éstas tiene un efecto significativo en el patrón del spray. Sellens y Wang [6], promueven el análisis óptico de patrones de spray (OSPA) que proporciona un campo completo cuantitativo de un spray en donde otras técnicas solo brindan información cualitativa. Esta técnica corrige las imágenes de un plano de luz de manera que permite tener en cuenta variaciones en la iluminación local debido a la extinción de la cortina de luz, variaciones en la intensidad en la dirección transversal, y la dispersión radial. Además de funcionar en problemas en estado estacionario, puede usarse en casos con variaciones de tiempo significativas. La fuerte intensidad de la imagen disponible de la dispersión en el plano frontal contra la luminiscencia, da una ventaja significativa con sprays de masa reducida que incluye casos como los inhaladores de dosis (MDI) y flujos de nieblas generadas por ultrasonido. En esa misma línea, McLean et al. [8], presentan la “patternación” como técnica óptica que da la relación entre la imagen fluorescente y la imagen Lorenz-Mie, y se utiliza para construir un mapa espacial de la relación Vol/Area del aerosol ( $D_{32}$ ). Con ella, se pueden construir mapas tridimensionales de la estructura del spray, la distribución de masa y la distribución de tamaños de gota por apilamiento de imágenes.

El uso de PIV para el análisis de sprays se ha incrementado, de nuevo, es frecuente encontrar esquemas combinados. Palero et al. [5], hicieron análisis de sprays mediante SPIV, comparándose con mediciones con PDA favorablemente y también contra PIV. El trabajo de Golovanevsky et al. [7], sobre el uso de PIV en análisis de quemadores, brinda buenos detalles de ayuda para esta técnica. Pastor et al. [12], presentan una metodología completa para hacer mediciones de concentración de sprays de diesel en condiciones isotérmicas mediante PLIF, usando la luminiscencia natural del diesel. Serpengüzel, et al. [17], determinaron tamaños de micro gotas mediante la técnica de LIF. Palero e Ikeda [60], utilizaron PIV estereoscópico para determinar las estructuras tridimensionales causadas por la interacción de las gotas y el flujo de aire circundante, e incluso, han utilizado PIV de múltiples capas de intensidad para determinar el comportamiento de las gotas en el campo de flujo. Seneschal et al. [20], con el fin de obtener las características de un inyector de varios orificios, desarrollaron un procedimiento de medición utilizado una cámara de alta velocidad para determinar las características del chorro en términos del patrón del mismo, la velocidad al extremo y el ángulo del spray a alta presión. Jin et al. [24], utilizaron una técnica combinada de PLIF y teoría de Lorenz-Mie para determinar el diámetro Sáuter de un spray en condiciones transitorias donde éste, se determina como la relación de las intensidades de luminiscencia (PLIF) y difracción de Mie. Park [27] analizó el comportamiento de sprays de gas LP comparándolos con sprays de diesel utilizando la

fotografía rápida y observando que las mejoras en la combustión se deben entre otras cosas, a la mayor presión de la cámara, sin embargo existe una gran influencia de la geometría de la cámara de combustión. Con el fin de observar la respuesta de un spray a bajas frecuencias dentro del análisis de las oscilaciones en combustores, Eckstein et al. [25], realizaron mediciones de  $D_{32}$  y amplitud de sprays, bloqueadas en fase con PIV en condiciones transitorias, obteniéndose que las características del atomizador pueden obtenerse usando las correlaciones en estado permanente y usando la velocidad inestable del quemador. Algunas mediciones en sprays de inyectores de combustible, han mostrado que existe un efecto favorable causado por un campo eléctrico, reduciendo el tamaño de gotas [30, 34, 35, 40].

El uso de video de alta velocidad en la atomización de fluidos viscoelásticos enfocándose en la estabilidad de las cortinas formadas donde se observa que las cortinas son más estables y se alargan en tanto se incrementa la viscoelasticidad, Thompson y Rothstein [33]; el estudio experimental del spray de licor negro en condiciones de alta presión y temperatura con el fin de optimizar las condiciones del spray, usando “shadowgraph” y HSC, Risberg [37]; el uso combinado de PDA y visualización con cámara CCD para estudiar y cuantificar los coeficientes que producen cavitación en el orificio de la tobera, y ver que ésta induce una mayor atomización, Suh y Lee [39]; la definición de protocolos para medir los parámetros de sprays como  $D_{32}$  y  $D_{0.9}$ , penetración, ángulos de cono, teniendo como elementos de medición la imagen de sprays, el uso de la “patternación” de alta resolución, y determinación de tamaño de gota vía PDA o difracción, todo para la medición confiable de sprays de gasolina, principalmente aquellos de GDI, Hung et al. [38]; el uso de PIV e ILIDS para medir simultáneamente la velocidad de gotas y del aire circundante, permitiendo discriminar entre gotas y partículas trazadoras en un spray polidisperso, Hardalupas et al. [43]; el uso de la técnica LIF con dos colores para determinar la temperatura de una gota, con el fin de salvar el efecto que puede tener el diámetro de la gota, Labergue et al. [44]; la comparación entre dos métodos distintos para obtener información de un spray PDA y un “patternador” óptico, Muliadi et al. [45], el uso de tomografía con el que se obtienen contornos de densidad y se comparan contra mediciones mecánicas midiendo directamente el frente iluminado, Sivathanu et al. [47]; son fiel reflejo de la tendencia a mejorar los resultados obtenidos en el análisis de sprays, combinando varias técnicas de medición.

Muy recientemente (agosto 2010), Ejim et al. [49], publicaron un análisis sobre los efectos causados por la viscosidad y tensión superficial en sprays asistidos con aire. Se midieron los diámetros con PDA notando que los efectos observados son poco significativos en las condiciones efectuadas.

### **1.5.2. Tanques mezcladores.**

El uso de tanques mezcladores para la agitación, mezclado, emulsificación, incorporación de componentes, homogeneización, reacción química, aereación, etc., que involucra a dos o más componentes en fases líquida-líquida, líquida-sólida, líquido-gas es muy común en la industria de procesos por lo que han sido tratados ampliamente en la literatura, desde los manuales de ingeniería y libros donde se pueden obtener los parámetros básicos para su dimensionamiento, y tratamiento general para su análisis, e.g. Holland y Bragg [73], Perry y Green [69], o como en Bakker y Gates [72], que incluye criterios de diseño para el manejo de fluidos no-newtonianos, o aportando criterios generales para la selección de agitadores, Bakker y Gates [72]. El esquema convencional para esta labor es el mezclado



mecánico que involucra rotores de diversos tipos, tanto para el caso laminar, como para el turbulento, aunque existen otros procedimientos como el uso de corrientes de líquido o de algún gas o esquemas más novedosos como el propuesto por Harvey et al. [82].

Independientemente del elemento utilizado para el conocimiento detallado de su comportamiento o como ayuda para el diseño en la industria, el estudio de estos dispositivos sigue vigente, abordándose de forma experimental y numérica utilizando para la primera las herramientas modernas como la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) y en la segunda, incorporándose esquemas de análisis de diverso tipo, particularmente para el análisis de flujos complejos sea por sus características turbulentas, por ser multifásicos, o flujos con reacciones químicas. Por su importancia para este trabajo se discuten en particular los tanques mezcladores con elementos mecánicos, sean rotores de flujo radial o de flujo axial.

En cuanto al modelado y simulación numérica de tanques mezcladores, se usan desde los esquemas actuales complejos como DNS, LES, RANS, etc., hasta códigos como FASTEST-3D y FLUENT<sup>®</sup>, ver por ejemplo, [70, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 92]; otros autores combinan su trabajo complementándolo con experimentos, [69, 75, 88, 90, 91, 93]; y otro grupo solo aborda el análisis experimental, [74, 83], sumando a esta lista, algunos trabajos de otros problemas pero que aportan al análisis experimental de mezcladores [50-59, 61-68].

Bakker y Fasano [71], determinaron el tiempo de mezclado y la distribución química en tanques agitados en régimen turbulento mediante CFM como herramienta para el diseño. Bakker et al. [75], usaron LES para la predicción de las estructuras caóticas de gran escala que se presentan en tanques de mezclado tanto para rotores Rushton, como axiales obteniendo resultados satisfactorios al compararlos con experimentos con PIV. Bartels et al. [76, 77], reportan su trabajo de CFD (FASTEST-3D), comparando RANS con DNS y

– en el caso de rotores Rushton en un amplio intervalo de  $Re$ , mientras que Oshinowo et al. [78], Bakker et al. [79] hacen lo propio usando LES. Posteriormente, Bartels et al. [80], incorporaron esquemas de cálculo vectorial-paralelo para el análisis de tanques mezcladores. Oshinowo y Bakker [81], efectuaron un análisis con CDF (FLUENT<sup>®</sup>) de suspensiones sólido-líquido en un rango de sólidos desde 0.5 a 50% (en vol.), en tanques agitados. Montante y Bakker [84], analizaron la distribución de sólidos en mezclas sólido-líquido en tanques con diversas configuraciones de rotores y arreglos mult rotor con flujos turbulentos donde el aspecto más difícil de modelar es la interacción entre los rotores, que incluye problemas de discontinuidad en los perfiles de concentración cuando se utilizan rotores axiales modelándose con esquemas euleriano-euleriano (granular) para el tratamiento de la mezcla, y diversos modelos de turbulencia desde – , hasta RSM, este último particularmente utilizado en el modelado de mezcladores Rushton sin mamparas que conlleva flujos con giro intenso. Montante y Magelli [85], analizan la capacidad del modelado de diversas técnicas de CFD en mezcladores sólido-líquido para el caso de mezcladores con uno o varios rotores utilizando bajas concentraciones de partículas de vidrio mediante esquemas eulerianos y modelos estándar – , identificándose el esquema más adecuado para ese caso.

Portela y Oliemans [86], ofrecen un panorama general sobre el modelado de flujos dispersos, incluyendo el caso de tanques mezcladores comparando distintos esquemas computacionales: Euleriano-Lagrangiano y Euleriano-Euleriano. En el primero, la fase continua se resuelve utilizando RANS o DNS/LES y la dispersa siguiendo a la partículas,

en el segundo la fase dispersa se promedia dando por resultado un conjunto de dos ecuaciones similares a RANS, este esquema es el más utilizado en la industria pero requiere de una gran cantidad de modelado lo que puede ser una debilidad por la necesidad de contar con modelos adecuados para los fenómenos complejos involucrados; el primero parece más simple sobre todo en condiciones de frontera complejas, flujos poli-dispersos y en casos de coalescencia/rompimiento, mientras Martínez [87], retoma el uso de CFD comercial, FLUENT<sup>®</sup> para el análisis de tanques mezcladores con rotores Rushton y Montante et al. [88], analizan el efecto de la excentricidad de la flecha en tanques mezcladores usando RANS dejando ver que los modelos de turbulencia deben elegirse con cuidado, obteniéndose mejores resultados con esfuerzos de Reynolds que con modelos  $k-\epsilon$ . Los trabajos más recientes incluidos en esta línea son los de Fan et al. [89], que utilizaron LES para el análisis de tanques mezcladores, y el de Yapici et al. [92], usando en este caso, FASTEST-3D en el análisis de tanques mezcladores con rotores Rushton, para valores elevados de  $Re$  ( $>60000$ ).

En cuanto a trabajos experimentales que se complementan con simulación numérica (o viceversa), se comentan los siguientes: Bakker [70], efectuó el análisis de diferentes rotores usando FLUENT<sup>®</sup> y validando con LDV, desarrollando un modelo predictivo para el flujo líquido-gas que se incorpora mediante Ghost! (Gas holdup simulation tool!), usando también fibra óptica para la medición de las burbujas. Bakker et al. [75], usaron LES para la predicción de las estructuras caóticas de gran escala que se presentan en tanques de mezclado tanto para rotores Rushton, como axiales, obteniendo resultados satisfactorios al compararlos con experimentos con PIV.

En trabajos recientes, Montante et al. [88], han investigado el efecto de la colocación excéntrica de la flecha en un tanque mezclador utilizando PIV así como CFD con RANS y modelos de turbulencia RSM y  $k-\epsilon$ ; Fan et al. [90], estudiaron el flujo laminar de partículas sólidas en suspensión usando PIV y un método numérico iterativo mejorado, observándose para este caso una influencia del claro entre el rotor y el fondo alta, a menor distancia, menores velocidades radiales y axiales y mayor concentración del sólido. Pacek et al. [91], analizaron el flujo en un mezclador (Silverstone: esquema rotor estator de alto cortante) mediante simulación numérica utilizando FLUENT<sup>®</sup> con un modelo  $k-\epsilon$  estándar, verificándolos mediante LDA. Los resultados numéricos subestiman la disipación de energía en la cercanía de la cabeza del mezclador. Nurtono et al. [93], utilizaron LES para el modelado de las inestabilidades asociadas a escalas de tiempo grandes (macro-inestabilidad) en distintas configuraciones de rotores, visualizando con cámara de video.

Además de revisar los trabajos experimentales realizados con mezcladores, se reportan algunos trabajos sobre técnicas asociadas a la medición con PIV/PLIF, que son útiles y necesarias en la experimentación. Merklinger [50], ofrece los detalles acerca del principio de Scheimpflug para corregir la distorsión óptica en PIV-3D, Schabacker y Bölcs [51] discuten sobre el uso de las imágenes obtenidas con PIV para estudiar la turbulencia, en su trabajo se usaron solamente 126 imágenes, aunque en muchos casos se requieren muchas más. Usera [52], discute sobre el uso de métodos adaptativos para el análisis de imágenes de PIV, proponiendo algunas mejoras. Lindken y Merzkirch [53] realizaron la medición simultánea de un flujo en dos fases, donde la fase dispersa son burbujas generadas, y se ayuda en la iluminación con una placa de leds sincronizados y colocados detrás de una pantalla. La medición se logró con una sola cámara aplicando enmascaramiento (“masking”). Para evitar distorsiones ópticas producidas por los modelos cuando se usa

PIV, buscando identificar zonas de estancamiento y zonas con grandes esfuerzos cortantes, Day et al. [54], usaron un material y un fluido con índices de refracción similares, su trabajo incluyó análisis numérico con TascFlow. La misma técnica fue aplicada en los modelos por Uzol et al. [56], Day et al. [57, 59]. Day y McDaniel [64, 65]: al analizar un problema de bombeo de sangre en condiciones estacionarias y transitorias, encontraron que el análisis en estado permanente da información relevante del caso transitorio, por lo que se puede tener un análisis más simple,

Nishino y Choi [66], usaron también la misma técnica, ahora en un motor de combustión interna, con PIV-3D. El uso de burbujas en la medición con PIV, como en este trabajo, fue utilizado por Abdulmouti [58]. Para estudiar burbujas en 3D, Hassan [62] utilizó un esquema de 3 cámaras, 2 de ellas para sombrear y poder reconstruir la imagen 3D de la burbuja. Para resolver el problema de las partículas en túneles de gran tamaño, DeLapp et al. [67], utilizaron CO<sub>2</sub> líquido. En cuanto a estudios combinados. Miessner et al. [68] utilizando dos cámaras CCD estudiaron simultáneamente mediante PIV/PLIF, el movimiento e impacto de una gota sobre una interfaz agua-aceite.

Myers et al. [74], que analizaron las inestabilidades del campo de flujo en un tanque mezclador con impulsor axial en régimen turbulento usando PIV, identificaron frecuencias muy por debajo de la frecuencia de paso lo que afecta a modelos donde se utilizan promedios temporales. El resultado tiene implicaciones importantes para el modelado computacional porque en muchos casos, se basan en campos promedio con una turbulencia sobreimpuesta. Esto podría no modelar exactamente el mezclado asociado con los fenómenos de bajas frecuencias observados. Aubin et al. [83], midieron con PIV en tanques mezcladores, para ver la influencia de burbujas de gas en un tanque con rotor axial bombeando hacia arriba y hacia abajo. Este trabajo es muy similar en algunos aspectos al aquí presentado, aunque ellos presentan el análisis de dos fases, la líquida y la aireación del tanque mediante rotores axiales, con PIV.

### **1.5.3. Emulsiones y aplicaciones.**

El uso y manejo de las emulsiones en muchos campos de aplicación es muy amplia lo que lleva a la necesidad de conocer con detalle su comportamiento reológico [94-153, 155-160, 162-163, 166-168]. Por ejemplo, están presentes en gran diversidad de alimentos donde la apariencia y estabilidad determina la calidad del producto [100, 122, 124, 160, 163, 168], en la producción de medicamentos [112, 163, 183], como medio para el transporte de fluidos viscosos [96, 104, 107, 115, 129, 148, 149, 154 161], como medio refrigerante /lubricante [157-159, 162, 166-167], el secado con sprays [175,176,181], y la combustión de combustibles emulsionados [156, 170-174, 178, 179, 182 ], entre otra aplicaciones. Dependiendo de la aplicación, pueden ser emulsiones agua en aceite (WO) [96, 97, 98, 103, 105, 106, 108, 109, 114, 117, 120, 121, 123, 127, 135, 138, 139, 141, 142, 144, 145, 146], aceite en agua (OW) [ 95, 100, 101, 102, 107, 111, 112, 113, 115, 119, 122, 124, 136, 147, 148, 149, 150, 151, 155, 162, 168], o alguna forma más compleja que las anteriores, e.g., (WOW) como en [110, 133], o (OWO) [116]. La industria del petróleo produce emulsiones naturales indeseadas que han creado la necesidad de estudiar su estabilidad y la manera de destruirlas por diversos medios [96, 97, 119, 125, 126, 130, 131, 132, 134, 137, 140, 143, 153].

Aun cuando las emulsiones se han usado durante siglos, la primera referencia formal encontrada se debe a Griffin [94], donde se plantean conceptos generales, mencionándose algunas de las características de rompimiento, estabilidad, coalescencia, enfatizándose el

efecto del surfactante en las cualidades del spray. Además de este trabajo base, Salager [99], ofrece una descripción muy clara sobre las emulsiones y sus propiedades, Salager et al. [104], discuten ampliamente las posibilidades de manejo y uso de los crudos extrapesados ( $^{\circ}\text{API} < 10$ ) e identifica la alternativa de las emulsiones OW en lugar de la dilución, o el manejo a temperaturas elevadas, y Brennen [118], discute los fundamentos y teoría básica de los flujos multifásicos, incluyendo burbujas y rompimiento de gotas en sprays, entre otros.

En el lapso entre la fecha de [94] y la actual, se han generado cientos de trabajos, siendo el tema más abordado –de hecho, se aborda de alguna manera en prácticamente todos los trabajos –, la naturaleza de las emulsiones, *i.e.*, estudios reológicos que caracterizan sus propiedades de acuerdo a sus componentes, y muy especialmente, a los tensoactivos (surfactantes) que llevan a una emulsión estable. McLean y Kilpatrick [97], estudiaron el efecto de los asfaltenos -que se comportan como surfactantes naturales-, sobre la estabilidad de las emulsiones WO de crudo, Becerra et al. [101], estudiaron el efecto del aceite de emulsiones OW sobre acero al carbón, se analizaron distintos tipos de condiciones hidrodinámicas, y se encontró que el efecto es función de la IPR (relación de fase interna); para bajas IPR ( $< 20\%$  de la fase dispersa), la actividad electroquímica fue ligeramente mayor que la de la solución surfactante, en el caso de IPR medias (20 a 45%) nada sustantivo, y con IPR entre 45 y 70, se notó una disminución en la actividad. Se concluyó que la formación de una capa de aceite sobre la superficie, y la estabilidad, dependen de los esfuerzos inducidos hidrodinámicamente. Se planteó que la capa de aceite depende del IPR normalizado. El efecto de la corrosión pasa por un máximo dependiendo de la cantidad de aceite en la emulsión. Se utilizaron en las mediciones un difractor Malvern, y un reómetro Haake. Kawaguchi et al. [102], analizaron las propiedades reológicas de emulsiones OW estabilizadas por éteres (Poly(oxyethylene) Alkyl), midiéndose los tiempos de obtención de los parámetros deseados de acuerdo a los componentes, se caracterizaron OW, determinando tamaños de gotas y viscosidades, entre otros. Jiao y Burgess [110], trabajaron en la estabilización de una emulsión doble WOW -obtenida mediante 2 distintos surfactantes-, se obtuvieron adicionalmente, sus características reológicas, determinándose las cantidades que producen una emulsión estable. Palanuwech y Coupland [111], analizaron la desestabilización, causada en emulsiones OW, por la acción de los surfactantes. Silvander et al. [112], trabajando con OW investigaron el efecto de la adición de electrolitos: el agregado de cloruro de sodio no tiene efectos sobre la viscosidad, y los efectos del cloruro de calcio, aún a bajas concentraciones, si son importantes. Se encontró que la viscosidad máxima ocurre para valores cercanos a cero del potencial Z. El incremento en viscosidad se debe a la floculación que da un incremento en el volumen aparente de la fase. Se obtienen resultados similares con cloruro de magnesio, con un máximo desfasado hacia mayores concentraciones, a causa del enlace al agua más fuerte que el del calcio. Al agregarse un anticoagulante cargado negativamente, causa floculación en presencia de pequeñas cantidades de calcio. Chen et al. [119], discutieron los efectos causado por las fracciones del petróleo sobre la estabilidad de emulsiones OW; se analiza principalmente el efecto de los aromáticos y el ph, con un resultado favorable para las condiciones básicas en cuanto a estabilidad. Lorenzo et al. [124], investigaron el efecto de la adición de hidrocoloides como estabilizador para producir emulsiones OW con contenido lipídico reducido, se analizó el efecto de la composición, en la viscosidad y propiedades viscoelásticas de emulsiones OW de bajo contenido graso. Usando agua destilada, un aceite y distintos emulsificadores, produjeron distintas emulsiones modelo (WO y WOW) con el

fin de analizar su microestructura, estabilidad y reología. Se estudió el efecto del contenido de agua en una de ellas, encontrándose que en las concentraciones menores, se obtienen emulsiones WO y cuando se tienen porcentajes elevados, la emulsión es WOW, Márquez et al. [133]. Al-Sahhaf et al. [135] estudiaron el efecto de la aromaticidad del aceite, la relación de resinas a asfaltenos (R/A), y el pH del agua sobre la estabilidad de emulsiones petróleo crudo WO. Se menciona como un gran problema, la resistencia de las emulsiones WO durante la producción y transporte de crudo, encontrando que a valores de 30% de tolueno, se producen emulsiones muy estables, los resultados muestran que el incremento de la relación R/A produce emulsiones menos estables, y que el incremento en el pH, también reduce la estabilidad de la emulsión. Arriola-Medellin et al. [136], reportan los avances efectuados en México respecto a las emulsiones OW, analizando experimentalmente el efecto sobre la viscosidad, del contenido de surfactante y de la velocidad en el mezclador con el fin de obtener gotas más finas y uniformidad en la distribución de tamaños de gotas. Al-Sabagh et al. [144], estudian la reología y surfactantes de emulsiones WO. deOliveira et al. [151], discuten el problema de la formación de emulsiones durante la producción de petróleo, los asfaltenos y resinas funcionan como surfactantes naturales y la presencia de sólidos finos forma películas resistentes en la interfaz. Se encuentra que la presencia de agua arriba de un valor umbral, promueve la formación de gel de emulsión de crudo parafínico, cambiando la viscosidad de la mezcla. Se observaron emulsiones con contenidos de agua hasta de 70%.

Como ya se menciona, aunque el surfactante es un componente muy importante, en realidad solo sirve para poder aglomerar a los fluidos que componen la emulsión, teniendo éstos, *i.e.*, las fases continua y dispersa, un gran efecto en las propiedades. En la lista que sigue, se tratan los efectos de los componentes, incluyendo procedimientos y esquemas que producen algún cambio en las características de la emulsión, o bien, que se utilizan para efectuar las mediciones.

Pal [95] abordó la reología de emulsiones aceite en un fluido no newtoniano (ONNF), éstas, presentan un incremento en la viscosidad aparente, con comportamientos similares a los de suspensiones. Las viscosidades son significativamente menores que en los casos de emulsiones aceite en fluido newtoniano. Montesi et al. [105], estudiaron el efecto de la adición de polímeros disueltos en la fase continua de emulsiones WO, encontrando que el efecto es más notorio para concentraciones bajas de la fase interna de tal forma que las características viscoelásticas dependen principalmente de la concentración de la fase dispersa. Mendonça et al [109] caracterizaron reológicamente una emulsión WO (de aceite de soya), utilizando medios electroquímicos para determinar las características. Yaghi [113], analizó el efecto producido al agregar partículas finas en el rango 0 a 2%, en emulsiones OW. Presenta resultados para el esfuerzo cortante como función del aceite y los sólidos, éstos no siguen el comportamiento convencional por lo que se obtuvo una correlación de tipo exponencial, este trabajo presenta algunas semejanzas con el desarrollado en esta investigación. Lin y Wang [116], estudiaron una emulsión triple OWO en conjunto con un aditivo oxigenante, encontrando que la viscosidad aumenta con el incremento de la fase interna y la adición del agente oxigenante. Para comprara sus resultados, analizaron también emulsiones WO y OW; la adición produjo inestabilidad en los casos de WO y OWO, la presencia del agente oxigenado en la fase acuosa en lugar de la fase aceite reduce la estabilidad y la actividad de forma más severa, por el contrario, ambos parámetros aumentan con la adición del oxigenante, especialmente cuando se agrega al agua en las emulsiones OW. Chen [120], tratando de ver diferentes aspectos relacionados

con la presencia de emulsiones WO, que pueden llegar a ser un problema en el transporte de crudo, estudió detalladamente, entre otras cosas, la reología de emulsiones monodispersas, analizando los efectos de las concentraciones de la fase dispersa y la relación que tiene el tamaño de partícula en su comportamiento. En ese mismo año, Dan y Jing [121], desarrollaron un modelo para predecir la viscosidad en emulsiones no newtonianas de agua en aceite, validándose experimentalmente. Less et al. [138], utilizaron un campo eléctrico en WO, para ver su influencia sobre la coalescencia y DTG. Observaron un incremento de la viscosidad con la intensidad del campo eléctrico hasta un cierto valor, después del cual, ocurre coalescencia decreciendo irreversiblemente la viscosidad; el comportamiento puede atribuirse a la floculación de gotas inducidas por el campo, la estructura se rompe cuando se incrementa el esfuerzo cortante. Aunque existió coalescencia, no involucro a toda la muestra, por lo que no cambió significativamente el tamaño medio de la emulsión. Visintin et al. [142], con el fin de observar el impacto que tiene el agua en la gelatinización de crudo ceroso (waxy), encontrando que existe un valor arriba del cual se favorece la gelatinización, se examinaron las propiedades arriba y abajo de ese punto de gelatinización, proponiendo una estructura del gel de crudo ceroso para el análisis del impacto en pruebas estándar.

Una categoría importante en las emulsiones, es la que cubre a las emulsiones concentradas, denominadas como emulsiones de alta fase interna (HIPRE), y que cubren el requisito de que la fase dispersa sea mayor al 74% en volumen. Este sería el caso de numerosas emulsiones. Peker y Kizildemir [98], Pal [103], Pal [106], Malkin et al. [117], Lee [123], y Quintero et al. [139], analizaron este tipo de emulsiones, principalmente emulsiones WO, determinando sus características reológicas, relacionándolas con la composición y DTG, entre otros efectos.

Aunque las emulsiones se utilizan en una gran diversidad de aplicaciones, su fabricación se da por hecho en prácticamente todos los trabajos publicados, casi como excepción, se encuentra esa información en trabajos científicos. En dos trabajos muy recientes, se aborda este tema: Henaut et al. [147], discuten el interés de producir emulsiones OW con el fin de disminuir la viscosidad de petróleos extra pesados (*i.e.*, °API < 10), y analizan el efecto que tiene la granulometría y morfología para minimizar la viscosidad. Sánchez-Sánchez et al. [150], presentan resultados sobre el escalamiento de la producción de emulsiones OW, de aceite pesado en agua, dando información sobre los parámetros operacionales. Aun cuando no se han publicado trabajos acerca de este mismo tema, en el IMP también se han desarrollado estas mismas actividades.

Como se menciona en [120, 142], asociadas a la producción(extracción) de petróleo crudo, surgen naturalmente emulsiones WO que se vuelven un problema para el manejo del crudo, razón por la cual, las empresas petroleras y centros de investigación han trabajado en el desarrollo de diversas técnicas para eliminarlas. La lista incluida, contiene trabajos muy recientes.

Rondon et al. [125], estudiaron la estabilidad de emulsiones WO, observando la fenomenología fisicoquímica de la acción desemulsificadora. Zhernovoi [126], define un método para determinar cantidad de agua en una emulsión WO usando alto voltaje, y encontró que cuando se mueven los electrodos verticalmente, las gotas de agua se agrandan y precipitan. SINTEF [127], generó un reporte sobre la reología de emulsiones WO originadas con petróleo crudo que menciona estos problemas. Evdokimov y Novikov [130], estudiaron el comportamiento de emulsiones WO, identificando las condiciones críticas para la desemulsificación en función del contenido de agua, recomendando un 60-65% para

ese proceso con consumo mínimo de energía. Como consecuencia del lavado de tanques de aceite, se generan emulsiones OW con pequeñas cantidades de diesel y elevado surfactante, Kulik et al. [131], compararon la separación mediante coagulación y oxidación química. Lu et al. [132], estudiaron los efectos de separar una emulsión OW de crudo mediante soluciones de hidróxido y carbonato de sodio, dependiendo de la cantidad agregada, la emulsión es inestable lo que permite su rápida separación. Con el fin de estudiar la desemulsificación de WO con un contenido de agua de 78% (HIPRE), Tan et al. [134], ensayaron diversos métodos particularmente, el método químico de microondas (MChM). Se buscó identificar las influencias de los factores clave cambiando la temperatura, la cantidad de desemulsificante, y el tiempo de radiación de microondas. Para el caso del MChM se estudiaron la razón de desemulsificación y la eficiencia de separación en emulsiones OW con <30% de agua, WO >70% de agua, y de tipo múltiple entre esos valores. El método dio mejor resultado para contenidos de agua elevados. Frising et al. [137], analizaron los separadores de agua y aceite, que se diseñan usando la ley de Stokes, para determinar las contribuciones de la sedimentación y la coalescencia, en ese proceso, para ello, utilizaron en primer lugar una emulsión cargada de surfactante, que promueve exclusivamente la sedimentación, y después, con menos surfactante. En el último caso se presentan los dos mecanismos, por lo que al contrastarlos, se determina la contribución de cada uno. Rondón et al [140], estudiaron la acción desemulsificante de asfaltenos en WO. Silset [141] en su trabajo doctoral, estudió entre otros aspectos, el comportamiento de emulsiones WO y OW producidas durante el manejo de petróleo crudo, incluida el agua asociada, en un trabajo enfocado a resolver los problemas originados por la formación de emulsiones durante la producción de crudo. Al-Sabagh et al. [143], analizaron varios surfactantes con el propósito de ver su capacidad desemulsificadora, notando que su concentración aumenta la eficiencia, y en otros efectos, la presencia de asfaltenos la reduce. En los casos estudiados se planteó la desemulsificación como función del tiempo. Por su parte, Atta et al. [145], analizaron algunas mezclas de surfactantes con el propósito de estudiar la ruptura de una emulsión WO, usando concentraciones 50/50 y diferentes cantidades de agentes desemulsificadores. Por las características de su petróleo, Borges et al. [146], estudiaron la influencia de la salinidad y la relación WO en la acción demulsificadora. En el año 2010, Silset et al. [153], con el propósito de investigar si hay correlación entre las propiedades fisicoquímicas de los crudos y la calidad del agua producida, fabricaron emulsiones OW (30/70), empleando diversos crudos en el análisis, a baja velocidad -para asegurar que se separarían en corto tiempo- y se determinaron las DTG de éstas, encontrándose que el tamaño de gota, la densidad diferencial OW y la viscosidad, tienen un gran impacto sobre la eficiencia de separación.

En resumen, se puede notar que existe un interés creciente en conocer las condiciones para generar y destruir emulsiones, de manera que se puedan controlar y optimizar los procesos donde se aplican o utilizan.

En cuanto a la aplicación de las emulsiones, se presentan aquí algunos trabajos recientes relacionados a distintos campos de conocimiento: el de alimentos y bebidas, el de la tribología, y finalmente el de transporte de fluidos viscosos. En el caso de las aplicaciones en alimentos, bebidas y medicinas, existe un amplio interés y desarrollo de conocimiento, sin embargo, muchos son en gran medida difíciles de entender por el uso de componentes especializados por lo que solo se mencionan algunos de interés general.

Garza [100], en su trabajo doctoral, hace un amplio análisis que incluye la caracterización reológica, microbiológica y cinéticas de deterioro del cremogenado (jugo) de melocotón.

Dluzewska et al. [122], en su trabajo sobre el efecto de la concentración de aceite en emulsiones OW utilizadas, encontraron que la viscosidad y opacidad se incrementa al menos parcialmente por el incremento del tamaño de gotas de la fase dispersa y de igual forma con su concentración. Klinkesorn et al. [160], analizaron el efecto de una membrana de recubrimiento mediante deposición electrostática sobre gotas de una emulsión OW (aceite de atún en agua) con el fin de mejorar su estabilidad ante la oxidación. Recientemente, Knudsen et al. [163], investigaron el efecto del cambio de un emulsificante en emulsiones OW utilizadas en la adsorción de proteínas. Por su parte Sun y Gunasekaran [168], estudiaron la estabilidad como función del tratamiento térmico de emulsiones OW (proteínas).

Las emulsiones OW son lubricantes comunes en el rolado de metales y en algunos diseños de máquinas. El tamaño de las gotas juega un papel importante en la formación de la película, Szeri y Wang [157], otros trabajos relacionados con el mismo tema, son los de Yang et al. [158], Dubey et al. [159], Gutierrez et al. [162], Hu et al. [166], y Liran et al. [167], entre otros.

Un conjunto de aplicaciones más en la línea de esta tesis, es aquella donde se considera a las emulsiones como una solución para el manejo y transporte de fluidos viscosos. En este contexto, conviene recordar algunos conceptos ligados al transporte económico de un fluido por una tubería, donde existe el compromiso entre el mayor costo de un sistema de tuberías de mayor diámetro, contra el menor costo de bombeo asociado, lo que conduce a valores óptimos de los diámetros involucrados, problema ampliamente tratado en los textos de bombeo, incluyéndose en los textos más modernos, los conceptos de exergía y destrucción de la misma. Se incluyen en la lista, algunos trabajos relativos al manejo óptimo de fluidos viscosos, no necesariamente emulsiones, pero cuyos conceptos son válidos en lo general.

Khan [96], investigó los efectos de diversos parámetros en la reología de emulsiones WO de petróleo crudo, en particular, el efecto de la cantidad de agua, los que pueden ser relevantes en su transporte y procesamiento. Vlasak y Chara [154], teniendo en cuenta la necesidad de conocer las características reológicas del manejo de lodos altamente concentrados para la modelación y diseño apropiado y seguro de las líneas de tuberías determinaron experimentalmente el comportamiento de lodos. Peralta y Romo [107], discuten sobre el bombeo y combustión de petróleo extra pesado usando emulsiones OW. Langevin et al. [115], estudian las propiedades de emulsiones OW, crudo en agua, por sus implicaciones en el transporte de crudo. Se centran en el efecto viscoelástico -que existe a nivel de la interfaz- causado por los componentes del crudo por la fuerte influencia no lineal. Inesperadamente de acuerdo a los autores, las emulsiones proteínicas se comportan de manera muy similar a las emulsiones de crudo con asfaltenos. Dymaczewski et al. [161], discutieron la optimización del transporte hidráulico de lodos en cuanto a caída de presión en función del contenido de agua, tomando en cuenta por un lado, la influencia del flujo sobre la caída de presión y por el otro, la influencia de los parámetros reológicos. Se trata a los fluidos como no newtonianos de acuerdo al modelo de Bingham en régimen laminar. Tao y Xu [128], plantean un método para reducir la viscosidad de crudo, específicamente, para crudo parafínico, se puede reducir la viscosidad por varias horas, mediante un pulso magnético, para el caso de crudos con base de asfaltos y crudos mixtos, un campo magnético produce el mismo efecto, bajo estas condiciones, no se cambia la temperatura del crudo, el efecto se produce porque el pulso o el campo, agregan partículas de asfaltenos y también parafínicas, que modifican las propiedades reológicas, siendo el cambio solo temporal, se plantea como una alternativa para el transporte de crudo. Enríquez [129],



pensando en el transporte de hidrocarburos pesados, planteó un modelo para calcular las caídas de presión en tuberías, usando leyes de potencia o mezclas newtonianas. Gardea-Villegas [164], propone las condiciones para el cálculo del bombeo de lodos residuales, considerándolos como fluidos pseudoplásticos, -las emulsiones OW concentradas se comportan así- se enfatiza la conveniencia de manejarlos en régimen laminar. El manejo de lodos de alta concentración trae entre otros problemas, la dificultad de identificar con precisión el régimen de flujo, lo que puede conducir en ciertas condiciones al taponamiento de una tubería por lo que es necesario contar con bases de datos y modelos que permitan predecir las condiciones planteadas. Slatter [165], presenta un modelo para la predicción de fluidos visco-plásticos en diversos regímenes de flujo que permite su aplicación en el diseño. Mendoza [148], menciona las actividades realizadas en el LSC sobre el uso de emulsiones OW de crudo extrapesado para su transporte. Más formalmente, Ocampo et al. [149], discuten el trabajo que hace el grupo del LSC y el IMP en la investigación de combustibles emulsionados OW para el transporte de crudos pesados y extrapesados. Finalmente, en un trabajo del 2010, Hasan et al. [152], estudiaron distintos métodos de reducción de viscosidad de petróleo pesado, los resultados muestran que la dilución con cantidades limitadas de petróleo ligero dan el mejor resultado en cuanto a reducción de viscosidad.

La revisión de las aplicaciones de sprays de emulsiones se trata separadamente en la siguiente sección.

#### **1.5.4. Sprays de emulsiones**

Cuando se planteó este proyecto de investigación, el objetivo y alcances se definieron precisamente en este tema, para complementar el trabajo previo de estudio, desarrollo y análisis de emulsiones, de caracterización de sprays de combustibles, de diseño de boquillas de atomización, y de quemado de los mismos en el LSC del IMP; incluyéndose entonces, el desarrollo y caracterización de emulsiones OW, con el fin de obtener una emulsión modelo, que se utilizara en una boquilla de atomización para el análisis del comportamiento de sprays de emulsiones OW, bajo diversas condiciones. Como se comentó inicialmente, hacia el final de la fase experimental del proyecto (febrero 2009), la información obtenida en este tema era muy poca y se incrementó posteriormente. Del total de referencias aquí comentado, se incluyen 3 sobre sprays de emulsiones, en una aplicación muy relevante en el campo de los alimentos y medicamentos, el secado por spray (de este tema en realidad hay bastante material); 15 relacionadas a sprays de combustibles, de las cuales, 11 refieren al quemado de emulsiones WO, y el resto asociadas a las emulsiones OW; y 3 relativas a caracterizaciones de sprays, de las cuales una corresponde a 2009, y las dos restantes a este año. Algunas de las referencias incluidas, sirven de sustento a este trabajo al ser generadas por el IMP.

En cuanto al secado por spray (spray drying), Dollo et al. [175], reportan el secado por spray de emulsiones OW con fármacos, su conclusión más relevante es que el secado por spray de emulsiones puede ser una forma relevante para la dosificación, mejorando la biodisponibilidad de drogas que se absorben poco. Klinkesorn et al. [176], utilizaron el secado por spray de emulsiones OW, aceite de atún en agua, que se estabilizaron con recubrimiento de lecitina y chitosán (inhibidor de grasa) las cuales resultaron más estables ante la oxidación, y por tanto apropiadas por su contenido de omega3. Tratnig et al. [182], estudiaron y caracterizaron emulsiones atomizadas por una boquilla presurizada con giro, también, realizaron análisis reológicos sobre las emulsiones, utilizando PDA para el

análisis del spray, sin embargo, este artículo muy interesante no refiere a una emulsiones sino a suspensiones, de cualquier forma, los resultados generales pueden aplicarse de manera general al caso de emulsiones.

La línea de investigación de sprays de combustión es muy amplia, y en el caso de la combustión de emulsiones, existe inclusive una aplicación comercial consistente en combustibles diesel emulsionados con agua, *i.e.* WO, existiendo en el mercado estos productos. Sus ventajas sobre el diesel convencional son entre otras cosas, la disminución de contaminantes como consecuencia de la atomización secundaria producida por el rompimiento o explosión de las gotas de agua –que es causada por la temperatura de ebullición del agua más baja que la del combustible-. En contraparte, aún cuando existen las emulsiones OW y se proponen también como combustibles alternos, no se cuenta con suficiente información que permita discernir si sus ventajas son más relevantes que las desventajas, y sobre todo, si tienen un potencial importante en cuanto a su relación costo/beneficio. En particular, las instituciones de investigación sobre el tema de la combustión y desarrollo de combustibles en México (IIE y IMP), han estado promoviendo y planteando proyectos sobre el uso de las emulsiones como opciones para el transporte de crudo o como combustibles alternos.

Revisando cronológicamente lo publicado a la fecha sobre este tema, Lasheras et al. [169], con el fin de verificar la atomización secundaria, investigaron la combustión de combustibles emulsionados WO. Ballester et al. [170] realizaron un estudio para contrastar la combustión de emulsiones OW contra un combustible pesado. Se encontraron ventajas al usar la emulsión cuando el combustible pesado fue pobremente atomizado, pero éstas, se reducen significativamente cuando se produce una atomización fina del combustible pesado. Canfield [171], analizó el efecto en las emisiones del quemado de una emulsión WO (diesel). Con el fin de obtener información sobre la combustión de una emulsión OW, de combustible pesado en agua, Ocampo et al. [155] realizaron experimentos de combustión de gotas en una micro cámara de combustión, analizando particularmente el efecto del contenido de agua en la emulsión. Selim y Elfeky [172], analizaron la influencia del agua en la combustión de emulsiones WO (diesel) en un motor de inyección indirecta; la adición de agua controla NO<sub>x</sub> y tiene una gran influencia en el flujo de calor, la temperatura de pared y la carga térmica. Diego et al. [173], plantearon el desarrollo de la emulsificación OW de extrapesados, con el propósito de utilizarlos como combustible. Matthews [174], discute haciendo una revisión bibliográfica, el uso de combustibles diesel emulsificados para resaltar los beneficios en cuanto a reducción de emisiones para promover una formulación comercial (Purinox). Con el mismo fin del anterior, FSI [108], aborda la combustión de combustibles emulsionados WO resaltando la evaporación explosiva ya reportada por otros autores. Identifica el compromiso del tamaño de gotas con la evaporación explosiva, si son muy pequeñas existe una energía insuficiente para que se lleve a cabo y cuando son demasiado grandes, se reduce el número y la intensidad de explosiones (Petroferm's PEP-99™). Peckham [114], comenta sobre el uso de emulsiones WO de diesel comerciales (Gecam) que se utilizan en Italia. Ramírez et al. [156], presentan sus resultados sobre la producción exitosa de emulsiones OW generadas a partir de residuos de vacío, así como el planteamiento de su uso como combustible alternativo, actividades llevadas a cabo en el IMP. Lif y Holmberg [177], presentan una revisión sobre el desarrollo y uso de las emulsiones: WO (diesel), OWO (diesel), microemulsiones WO (diesel), WO (biodiesel) y otros esquemas; analizan el efecto del contenido de agua sobre los efectos en emisiones y eficiencia, observando que mientras que los NO<sub>x</sub> y PM disminuyen con el

contenido de agua, los HC y CO se incrementan y la eficiencia aumenta, ésta principalmente por el mejor quemado como resultado de las micro explosiones que ayudan a producir gotas mas pequeñas. Aunque se reconoce que las WO están en fase comercial existe información insuficiente sobre el efecto de los emulsificadores y sobre la estabilidad, entre otros aspectos, además de que el uso dirigido a motores necesariamente lleva a ajustes en el diseño. Esto se amplía aun mas para el caso de los otros combustibles analizados. Sánchez et al. [178], plantean alternativas tecnológicas para el manejo de crudos pesados de alta viscosidad y residuales del petróleo (IIE), siguiendo la misma línea de trabajo del IMP. Watanabe et al. [179], realizaron experimentos sobre gotas individuales para observar las características de la atomización secundaria causada por la micro explosión de las gotas en emulsiones WO. Ochoterena [180], en su trabajo doctoral, sobre el diagnóstico de “soot” en sprays de diesel utilizando medios ópticos (shadograph y HSC), estudió el desarrollo y combustión de emulsiones WO y de microemulsiones en combustibles, encontrando que en ambos casos, hay una reducción del “soot” respecto del diesel convencional. En 2010, Watanabe et al. [185], proponen un modelo para el resoplado (puffing) y las microexplosiones. En el primero, se plantea que la rapidez de cambio de masa de la gota durante el resoplo se expresa como la rapidez de evaporación del agua dispersada y el cambio de la masa de las gotas finas expulsadas desde la superficie de la gota. Se probó el modelo con una gota y después con la emulsión. La ocurrencia de los eventos fue determinada con la temperatura interna. Cuando ocurre una micro explosión, la gota cambia a vapor rápidamente. Cuando no se consideró el resoplido y las micro explosiones en la emulsión, los resultados difirieron de los experimentales, obteniéndose buenos al incluir el modelo. Experimentalmente se analizaron gotas individuales.

En cuanto a trabajos que tienen como objetivo principal el caracterizar el comportamiento del paso de la emulsión por una boquilla de atomización, que es el objetivo de la presente investigación doctoral, solamente se han identificado los 4 siguientes: Tratnig et al. [182] y Broniarz-Press et al. [181] del 2009, y Bolszo et al. [183], Qin et al. [184] del 2010, evidentemente publicados en fecha posterior a los experimentos de esta tesis; se puede comentar que existen semejanzas en cuanto a procedimientos, planteamientos o resultados generales, refiriéndose a emulsiones OW [182, 184], en los campos de alimentos y agricultura, respectivamente, y los dos restantes, a emulsiones WO [181 y183], el primero sin un campo preciso de aplicación y el último, en combustión.

Se comentan a continuación algunos detalles: Broniarz-Press et al. [181], analizaron sprays de emulsiones WO con boquillas asistidas con aire, se presentan los resultados en función de la relación másica de gas a líquido (GLR). Entre los resultados relevantes, se observó que para un mismo valor de GLR, el tamaño de gota de emulsión es mayor que para el caso de agua y que el valor  $D_{32}$ , se incrementa con la fracción volumétrica de aceite en la emulsión, incrementándose también con la viscosidad de la emulsión. Bolszo et al. [183], estudiaron experimentalmente emulsiones WO, tanto estables con surfactante, como inestables, en condiciones similares a las usadas en turbinas de gas. Las mediciones se hicieron con difractometría y “paternador” mecánico (recolector de emulsión formado por un conjunto de tubos colocados aguas abajo donde se recopila emulsión hasta que se alcance, en el que se llena primero, un 7/8 de llenado. Estas muestras se miden determinándose las cantidades y sus características). Entre los resultados encontrados, se menciona que los surfactantes afectan por el cambio que sufren las propiedades físicas, dependiendo de la cantidad de agua utilizada, se puede modificar el tamaño del spray. La atomización puede cambiar el tamaño de la fase dispersa dependiendo de los tamaños

iniciales. En el rango estudiado no existieron cambios significativos entre la emulsión estable y la inestable, siendo ésta de tamaños finos. Se encontró que el proceso de atomización conduce a una ligera separación de los componentes, con mayor densidad de agua en la parte externa del spray. Por último, Qin et al., 2010)[184], publican sus resultados sobre el interés de producir tamaños específicos de gotas para evitar los problemas asociados a gotas finas que pueden tener mayor impacto a la salud. Concluyen que las propiedades físicas de una emulsión tienen un impacto relevante sobre la DTG siendo los mecanismos de estos efectos aún desconocidos.

A posteriori, se pueden notar semejanzas en cada uno de los 4 trabajos con los de esta tesis, Tratnig et al. [182] en cuanto al estudio general y el planteamiento inicial para el desarrollo de esta tesis (uso de PDA), aunque usaron suspensiones en lugar de emulsiones; con Broniarz-Press et al. [181], algunos resultados cualitativos sobre los parámetros de sprays, aunque ellos analizaron emulsiones WO; con Bolszo et al. [183], el uso de difracción y el análisis de muestras recolectadas, aunque en el caso de esta tesis, las muestras fueron de todo el spray, sin seccionarlo espacialmente, observándose también ligera separación; y finalmente con Qin et al. [184], el uso de una emulsión OW con objetivos generales similares.

Con respecto a los trabajos de origen mexicano [107, 129, 136, 148, 149, 150, 155, 156, 164, 173, 178] relacionados con IIE e IMP, sólo se puede mencionar que son ideas o trabajos en la línea de demostrar la factibilidad técnica y económica del uso de emulsiones OW, para el transporte de crudos pesados y extrapesados, y para su uso como combustibles alternos.

Se puede notar que ha habido un crecimiento importante en esta actividad, reconociéndose que hay muchos aspectos por estudiar, modelar y entender.

-----

## Capítulo 2. Caracterización de Sprays con PDA y PIV (2D y3D).

### 2.1. Introducción.

El conocimiento detallado del comportamiento de una boquilla de atomización, del tipo que sea, es de vital importancia en gran cantidad de aplicaciones, por ejemplo, en el caso de su uso en sistemas de combustión, cuando se desea optimizar el consumo de energía y la emisión de gases a la atmósfera, las condiciones y características del spray inciden en ambos parámetros y por tanto, en la optimización del sistema. Con el fin de poder conocer con detalle el comportamiento de una boquilla neumática de atomización que sería utilizada en condiciones muy particulares en una cámara de combustión experimental de 500 kW, se definió esta actividad como parte del proyecto de investigación doctoral, es decir, la caracterización detallada de tal boquilla. Aún cuando se contaba con la información de diseño de la boquilla, las condiciones requeridas en su operación serían distintas lo que justificaba la necesidad de la caracterización. El interés de realizar este trabajo no estaba solamente en obtener la información, sino que ésta sirviera como base de datos con los cuáles se pudieran contrastar los obtenidos en los experimentos que se realizarían en la fase 5 del proyecto de investigación. En resumen, se tenía identificado un problema de interés y una herramienta idónea de trabajo, así que en esta fase se decidió abordar la caracterización de sprays mediante la técnica de anemometría de fase Doppler (PDA) mediante la cual, es posible obtener puntualmente el tamaño de gota, y al mismo tiempo, el campo de velocidad en dos dimensiones, que dependen principalmente de cómo se coloque la óptica del PDA en relación con el spray, en este caso, se colocó para obtener la componente de velocidad en la dirección axial del spray, y la otra componente, en el plano transversal, que se le denominó componente “tangencial”. A pesar del gran detalle que se podría obtener, incluyendo además de las componentes mencionadas, sus valores RMS, la información detallada carecería de más información en el plano transversal. En realidad la velocidad obtenida en el plano transversal, dependiendo de la posición relativa del volumen de medición dentro del spray, puede ser la velocidad tangencial y en otras, la componente radial lo que es útil, pero no da un panorama completo de la estructura del spray en planos transversales. Teniendo en cuenta esa limitante, y con base en el interés por determinar más detalladamente esas estructuras, se decidió complementar la información obtenida con PDA, mediante la velocimetría de imágenes de partículas, en dos dimensiones (PIV-2D), e incluso ir más allá, obteniéndose los campos mediante la velocimetría de imágenes de partículas, en 3 dimensiones (PIV-3D). Aunque la información obtenida con estas técnicas puede dar una imagen completa de todo el campo de interés, ésta pierde el detalle que se puede lograr con PDA.

Se debe comentar que cuando se inició el trabajo de investigación, se consideraba idóneo el uso de PDA para la fase terminal del proyecto, *i.e.*, la fase de atomización de emulsiones. Una vez planteado el objetivo de esta fase, se adecuó la instalación experimental y se realizaron los experimentos con PDA, acotándose arbitrariamente con base en los resultados favorables que se habían obtenido. Se limitaron principalmente para poder continuar con el desarrollo de las otras fases y para poder complementarlos con el uso de PIV-2D y posteriormente, PIV-3D. En algunos casos se cubrieron secciones limitadas, pensando que una vez se llegara a la fase 5, se retomarían los experimentos cubriendo más espacio.

Cuando se estaba en la fase 4 de este proyecto, con la intención de retomar las actividades que complementarían todo lo anterior, el PDA sufrió un fallo que intentó resolverse de diversas maneras, y finalmente, se tuvo que descartar totalmente quedando la base de datos

tal y como quedó en esta fase, teniéndose que recurrir como salida para la fase 5, a otro tipo de equipo, más simple pero también confiable.

Se presentan en este capítulo, que corresponde a la fase de obtención de una base de datos para su posterior complemento con la fase 5, los resultados más relevantes obtenidos con las tres técnicas. Inicialmente, se presentan los resultados obtenidos con PDA, posteriormente con PIV-2D, y finalmente, los resultados con PIV-3D comparándolos contra los de PIV-2D. Aun cuando la información de PIV puede ser relevante o interesante, es una información limitada.

## 2.2 Parámetros adimensionales involucrados.

Las características de un spray están en función de las variables que intervienen en el proceso, esto es, las características y propiedades de los fluidos involucrados, las características de diseño de la boquilla de atomización, las características y condiciones del medio ambiente en el que se descarga el spray, y la interacción que existe entre los fluidos; uno de los mecanismos iniciadores del rompimiento es la turbulencia, En el comportamiento de un spray intervienen una gran variedad de parámetros adimensionales, siendo los más relevantes, los números de Reynolds  $Re$ , Weber  $We$ , y Ohnesorge  $Oh$ , asociados a las condiciones de descarga del líquido, los números de Reynolds  $Re$  y Weber  $We$ , asociados a las gotas formadas durante la inyección del spray, y las relaciones de viscosidad y de densidades entre los dos medios, *e.g.*, Golovitchev y Corcione [32]. En el primer grupo, la dinámica general del chorro estará dada por el  $Re$ , las características de ruptura de la columna en ligamentos, parcelas o gotas, dependen del valor del  $We$ , que indica el tipo de mecanismo de rompimiento de gotas presente. El papel que juega la parte gaseosa está dada por la relación de densidades y solo será relevante si  $\rho_f / \rho_a < 500$  (Brennen [118]), lo que no ocurre con frecuencia. El valor crítico para que un chorro líquido pueda considerarse completamente atomizado es de  $We > 100$  (Wu et al. [2]), para valores menores a éste, el chorro estará formando ligamentos que posteriormente por las inestabilidades, se transformarán en gotas, los efectos viscosos ya sea dentro de la gota o entre la gota y el aire, se involucran vía  $Oh$ , y serán poco relevantes en tanto su valor sea pequeño, Takei et al. [21]. A pesar de que se ha trabajado mucho en la atomización y el rompimiento de gotas, no existe un criterio uniforme sobre cuando se dan los distintos tipos identificados y como consecuencia se reportan diversos valores de esos parámetros. En la tabla 2.1, se presentan los valores de los parámetros adimensionales de la presente investigación dependiendo de qué variables físicas se utilizan.

Tabla 2.1. Parámetros adimensionales

Variables físicas	$Re$	$We$	$Oh$
(1) $D_{0,f}, \rho_f, \mu_f$ ref [21]	2927.3	61635.6	0.085
(2) $D_{0,a}, \rho_a, \mu_a$ ref [10]	42802.8	60.3	0.00022
(3) $D_{32}, \rho_f, \mu_a$ ref [32]	1302.7	2.6	0.00124

Uno de los esquemas de producción de spray en las aplicaciones industriales, es la atomización asistida con aire en la cual se utiliza una corriente de aire para ayudar a la formación del spray ya sea mezclándolo previamente a la inyección en la cámara por la tobera -como en el caso presente- o mediante una corriente sin mezclar que envuelve al chorro de líquido, (Kim et al. [15]). En el caso particular de sprays para combustión, su uso está dirigido particularmente al manejo de combustibles pesados lográndose una disminución

en la potencia empleada en la atomización y una mejora en la combustión. En estos casos, no existe información detallada acerca de los valores críticos, pero evidentemente se espera que estos disminuyan a causa del efecto directo de la corriente de aire en las propiedades del flujo que se inyecta y por el efecto adicional de “swirl” que muchos de estos dispositivos tienen, (Jin et al. [24], Yang et al. [22]) y que normalmente produce un efecto estabilizador en un chorro y agrega una cantidad importante de cantidad de movimiento que produce una mayor interacción entre el fluido que se descarga y el aire del medio ambiente. Con el propósito de ubicar las condiciones de operación del atomizador bajo estudio, se puede observar de la tabla 2.1, que el valor de  $We$  del segundo caso corresponde al rompimiento en multi-modos, [2]. Si se considera el  $We$  del tercer caso, entonces se podría decir que las gotas sufren variaciones moderadas en su forma, Loth [26], estando muy cercano el régimen de atomización. Si se utiliza la información de [2], donde la longitud crítica de ruptura depende de  $We^{-2/5}$  y ajustada por [118], se tiene que ésta es de  $\sim 1.7$  mm, lo que la coloca fuera de la zona que el sistema de medición puede alcanzar. Los valores del  $Oh$  son pequeños en todos los casos por lo que se puede aceptar que el efecto de la viscosidad es pequeño en el fenómeno. Con base en lo anterior se supone que el régimen en la zona de medición es de atomización donde el diámetro de las gotas es mucho más pequeño que el diámetro de la boquilla, y que en la zona de medición donde la señal es pobre, cuando el spray es denso, pueden existir estructuras de forma compleja donde pueden ocurrir interacciones fuertes entre éstas que dan lugar a gotas [32].

El análisis de la información sobre la distribución y tamaños de gotas se basa en los siguientes parámetros: El diámetro medio aritmético  $D_{10}$ , y el diámetro medio Sauter (SMD),  $D_{32}$ , definidos por

$$D_{10} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} N_i \cdot D_i, \quad D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_T} N_i \cdot D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_T} N_i \cdot D_i^2}$$

donde  $N_T$  es el tamaño de la muestra o número de gotas involucrado, (ASTM [1]).

El SMD es un parámetro muy relevante en los procesos de combustión ya que refleja la relación que existe en el spray entre el volumen y la superficie de las gotas, por lo que un valor más pequeño refleja una mayor superficie de contacto con el aire, lo que dará mejores condiciones para la combustión.

## 2.3. Arreglos Experimentales

### 2.3.1. PDA

Con el fin de obtener la información deseada, se adecuó una instalación experimental consistente de tres partes principales: un banco de flujo que incluye todos los elementos para lograr y confinar el spray (sistema de bombeo para la recirculación del aceite, suministro de aire para la atomización, elementos de medición y control, boquilla de atomización, y sistema de eliminación de niebla); un sistema de coordenadas XYZ controlado por computadora para ubicar de manera automática la posición de la zona de medición; y el sistema de adquisición de datos: sistema PDA (láser Argón-ion de 6 W de potencia, módulo

de fibra óptica con divisores de haz, celda de Bragg, óptica emisora y receptora, módulo de detección con 4 foto multiplicadores, módulo de procesamiento, y el software para control y adquisición de datos (BSA flow). En la figura 2.1, se muestra un diagrama general de la instalación utilizada.

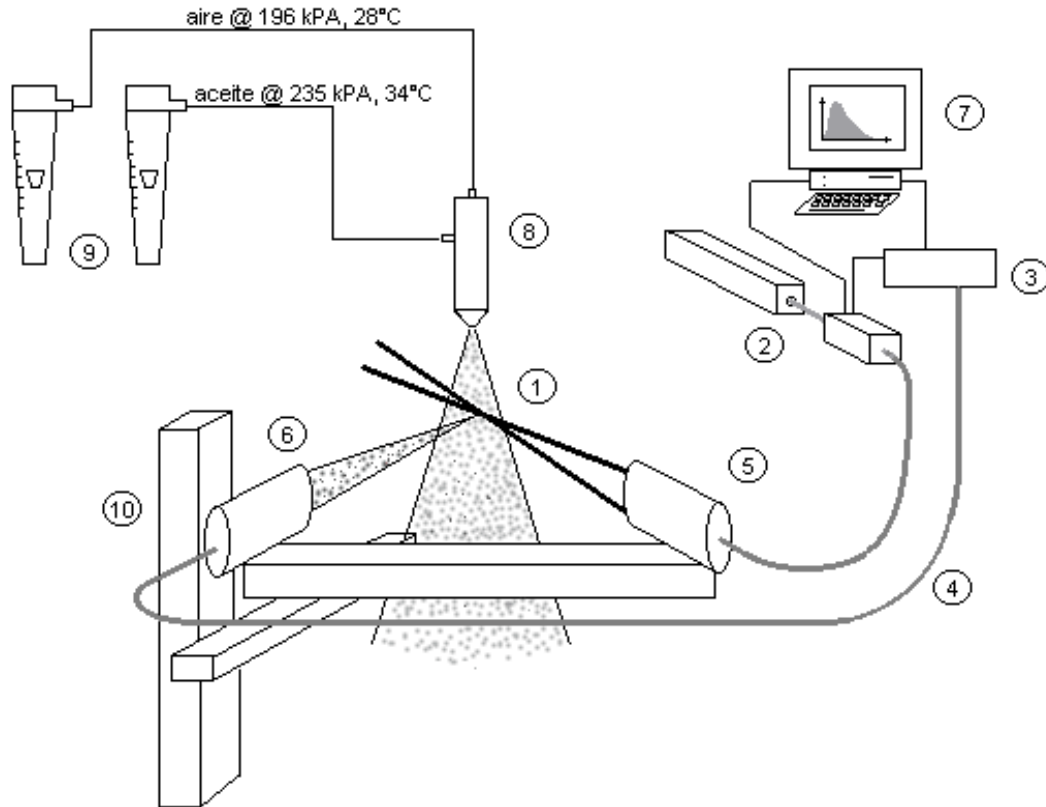


Figura 2.1. Esquema de la instalación experimental

donde

1. Zona de medición dentro del spray
2. Láser Argón Ion Clase IV y Módulo Fiber (divisores de haz, separador de color y celda de Bragg)
3. Módulo BSA P80 y Módulo Unidad de Detección (Fiber PDA, con 4 fotomultiplicadores)
4. Fibras ópticas
5. Optica emisora,  $f = 400$  mm
6. Optica receptora,  $f = 400$  mm
7. PC con Software de procesamiento de datos
8. Boquilla de atomización neumática
9. Rotámetros para medición de gasto
10. Mesa de coordenadas XYZ

La fuente láser produce un haz azul que se divide en dos haces con frecuencias de 488 nm (azul) y 514.5 nm (verde) los que a su vez se dividen en dos para hacer pasar uno de ellos por la celda de Bragg con defasamiento de 40 MHz -con el fin de poder determinar el sentido de la velocidad-. Los 4 haces abandonan el módulo de fibra óptica y se hacen cruzar en la zona



de medición mediante la lente de  $f = 400$  mm. Con la óptica receptora, que incluye la lente, la máscara que controla el paso de la luz hacia los foto multiplicadores en función del área de apertura de ésta, y los fotomultiplicadores, se obtiene la información del tamaño de gota en el spray y de dos componentes de velocidad, ambas normales a los planos formados por los haces que se cruzan en el volumen de medición. Entonces, tomando como referencia la figura 2.2, se tiene una componente de velocidad en dirección normal al plano del papel, que corresponde con la velocidad axial del spray y la otra perpendicular al plano vertical formado por los haces verdes e identificada en la figura como velocidad “tangencial” que nos da información parcial acerca del comportamiento del spray en la dirección transversal del mismo. Para lograr una buena señal, se utilizó un ángulo de  $68.5^\circ$  entre las ópticas emisora y receptora (ver figura 2.2) que está cercano al óptimo para el caso de una configuración para detección en modo refracción que fue el utilizado en los experimentos.

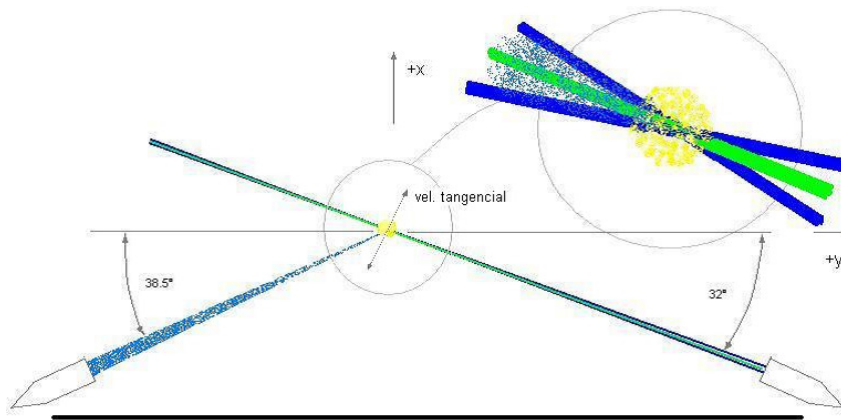


Figura 2.2 Coordenadas de PDA y ángulos de óptica

Aunque el sistema óptico no requiere una calibración para obtener mediciones confiables ya que éstas dependen de la frecuencia Doppler, la naturaleza aleatoria de las variables medidas requiere que el número de muestras sea elevado para que el error de muestreo se reduzca. La incertidumbre es proporcional a  $N_T^{-1/2}$ , [26], por lo que en este caso se escogió un número de muestras para cada punto de 10,000 (*i.e.* 1% de exactitud). El uso cada vez más extendido de funciones de densidad de probabilidad para el modelado de sprays, *e.g.*, (Beck y Watkins [23], Takei et al. [10]), requiere de una elevada confiabilidad en la información obtenida de manera que la función de densidad de probabilidad discreta se aproxime a la función continua.

La función de densidad de probabilidad de número  $f(D)$  en su forma discreta es

$$f(D_i) = \frac{N_i}{N_T \Delta D_i}, \quad \sum_{i=1}^{N_T} f(D_i) \Delta D_i = 1$$

Entre más pequeña sea la muestra mayor será la incertidumbre en la función de distribución obtenida.

### 2.3.2. PIV-2D

Para el desarrollo de los experimentos, se diseñó y construyó una instalación experimental consistente de un modelo en acrílico que incluyera la boquilla de atomización de interés, junto con los dispositivos adicionales para el control y desfogue del fluido, y la generación de partículas. El control de las condiciones de descarga en la boquilla de atomización se hizo mediante el ajuste de la presión con un regulador de aire colocado aguas arriba del mismo, midiendo al mismo tiempo las condiciones de temperatura del aire utilizado. Para determinar los campos de velocidad de la zona de interés, se utilizó la técnica de velocimetría de imágenes de partículas en dos dimensiones (PIV-2D), con un equipo compuesto de un láser pulsado de doble cavidad de 200 mJ, un haz de 532 nm y lente cilíndrica para producir la cortina de luz, una cámara CCD de 1024×1280 píxeles conectada al adquisidor y procesador de datos (FlowMap System HUB) a través de un módulo sincronizador, y la configuración y operación de todo el sistema mediante una PC con el software de análisis. Previamente, se determinaron las características básicas del spray con la ayuda de un micromanómetro con el que se definió la posición de apertura del regulador. El posicionamiento preciso de la cortina del láser y la cámara se dio con la ayuda de una mesa de coordenadas XYZ, manipulada también desde la PC. En la figura 2.3, se muestra un esquema de la instalación experimental,

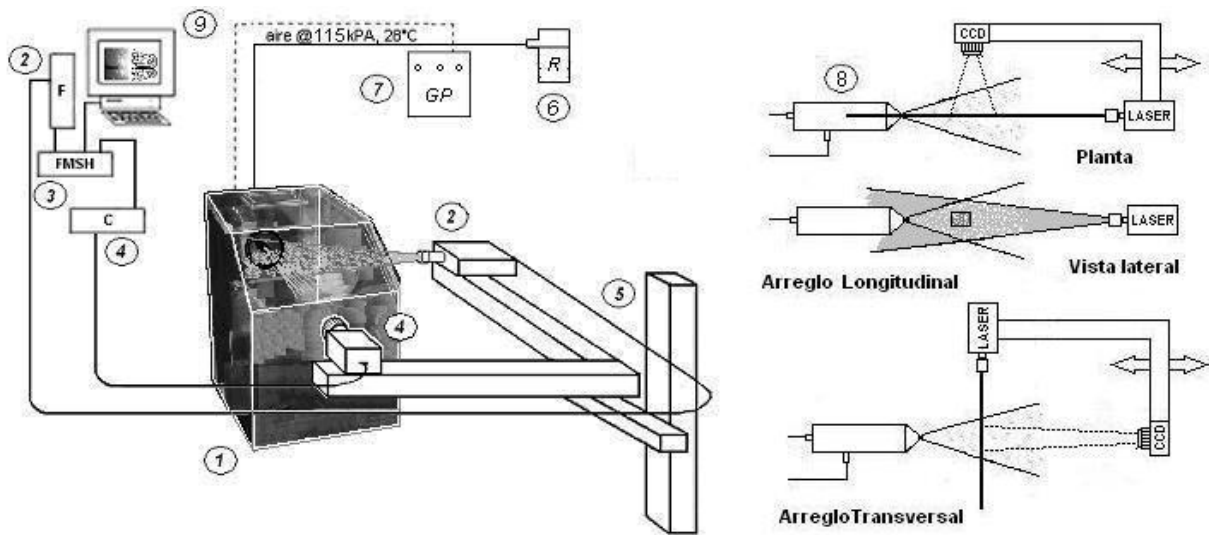


Figura 2.3. Diagrama de la instalación experimental, PIV-2D.

1. Modelo, zona de medición
2. Láser pulsado Nd:YAG doble cavidad y fuente (F), 532 nm (cortina verde), 200 mJ
3. Unidad de procesamiento FlowMap System Hub® (FMSH)
4. Cámara Hisense CCD 1024×1280 y unidad de sincronización con láser (C)
5. Mesa de coordenadas XYZ controlada desde PC
6. Regulador de presión del sistema de alimentación de aire a la boquilla
7. Generador de partículas (GP)
8. Boquilla de atomización
9. PC con Software Flow Manager® de procesamiento de datos

### 2.3.3. PIV-3D

La configuración para el análisis con PIV-3D se obtuvo a partir de la configuración del caso PIV-2D, agregando otra cámara CCD de 1024x1280 pixeles. A diferencia del caso con PIV-2D, la configuración requiere que las cámaras se coloquen separadamente, enfocando la zona de medición desde una posición angulada, lo que en principio genera una distorsión en la imagen. El valor óptimo de los ángulos de ambas cámaras con respecto de la normal a la cortina del láser es de  $\pm 45^\circ$  pero se recomienda que haya un ángulo entre ese valor y  $\pm 30^\circ$  para lograr los mejores resultados, sin embargo, eso dependerá principalmente de las restricciones del modelo experimental. Las figuras 2.4 y 2.5, muestran esquemas del arreglo experimental. En este caso, las dimensiones del modelo restringieron a  $-11^\circ$  para la cámara de la izquierda, y  $+14^\circ$  para la de la derecha, lo que dificultó necesariamente la obtención de una señal mejor. Para evitar la distorsión causada por la posición de las cámaras, se utilizó la corrección de Scheimpflug [50] (ver figura 2.6), en este caso, se logró con  $-2^\circ$  para la cámara de la izquierda, y  $+2.5^\circ$  para la derecha.

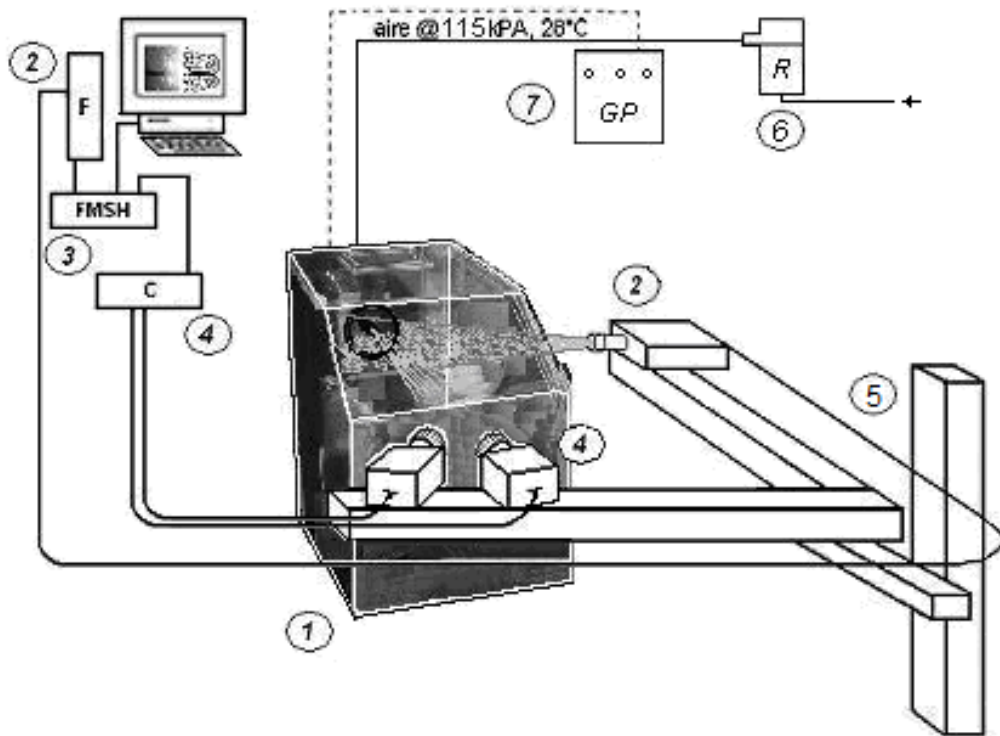


Figura 2.4. Diagrama de la instalación experimental, PIV-3D

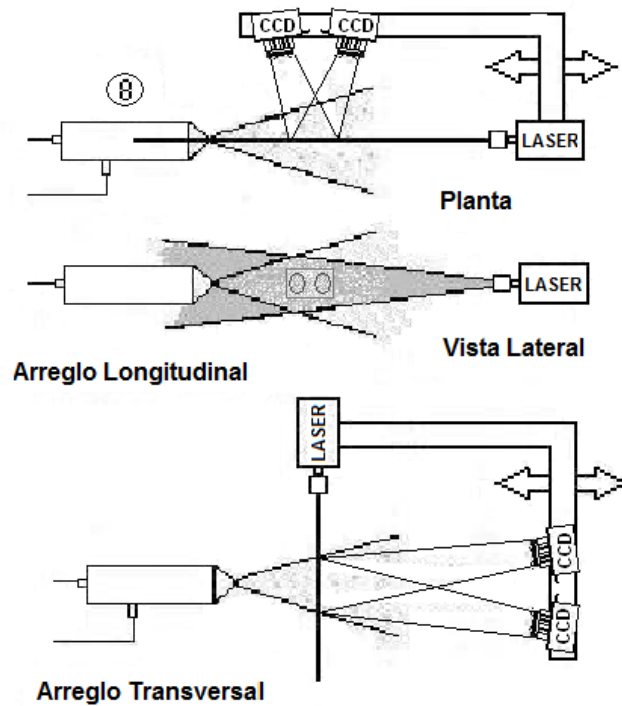


Figura 2.5. Diagrama de la instalación experimental, PIV-3D

1. Modelo, zona de medición
2. Láser pulsado Nd:YAG doble cavidad y fuente (F), 532 nm (cortina verde), 200 mJ
3. Unidad de procesamiento FlowMap System Hub® (FMSH)
4. 2 Cámaras Hisense CCD 1024×1280 y unidad de sincronización con láser (C)
5. Mesa de coordenadas XYZ controlada desde PC
6. Regulador de presión del sistema de alimentación de aire a la boquilla
7. Generador de partículas (GP)
8. Boquilla de atomización
9. PC con Software Flow Manager® de procesamiento de datos

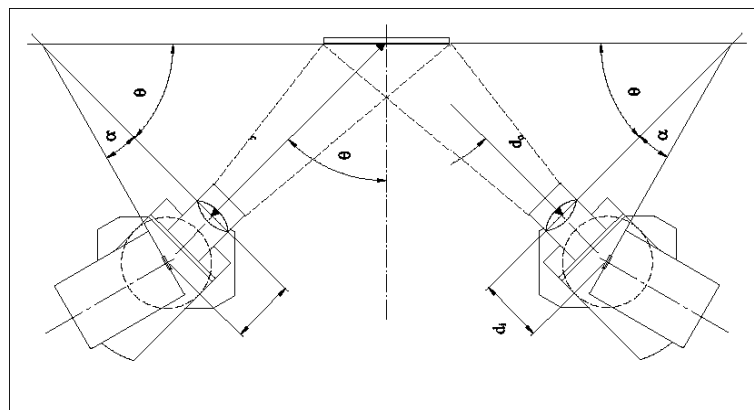


Figura. 2.6. Condición de Scheimpflug

## 2.4. Resultados

### 2.4.1. PDA

Como se mencionó en la sección anterior, con el fin de obtener una elevada confiabilidad en las mediciones realizadas, se optó por considerar como tamaño de muestra para cada punto de medición,  $N_T = 10,000$ . En virtud de las condiciones adversas para la medición en la región cercana a la descarga de la boquilla, donde se tiene un spray de alta densidad, se eliminaron del presente análisis todas aquellas zonas donde el número de muestras fuera menor a 150. El número total de muestras tomadas para los 745 puntos de medición fue de  $3.39 \times 10^6$ , con un total de puntos medidos de 678 y 741 para velocidad y diámetros, respectivamente, antes del corte, y de 665 y 664 una vez eliminados los datos mencionados. Con las mediciones validadas, se tiene una número promedio de muestras medidas por punto de 5007 y 5103, y una incertidumbre promedio de 1.41% y 1.40%, respectivamente. Del total de datos, se observa que en más del 91% de los puntos se obtuvieron mediciones y después del corte, en 89% del total.

En cuanto a las características macroscópicas del spray, se pueden ver con claridad en la figura 2.7 dos zonas, la interna donde hay una elevada densidad de gotas y la exterior donde se realiza la mayor interacción con el aire externo, los ángulos de apertura de ambas regiones son de  $62^\circ$  y  $20.5^\circ$ , respectivamente.

El primer valor está por debajo del especificado para las condiciones de operación de la tobera lo que es congruente con la desviación del valor de diseño.

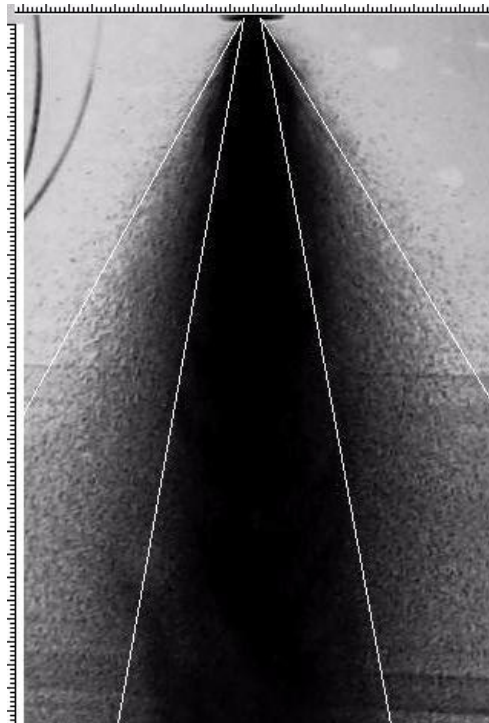


Figura 2.7. Spray en las condiciones de operación mostrando los ángulos del mismo.

Por restricciones en la instalación experimental, las mediciones se realizaron aguas abajo hasta una longitud de 115 mm, equivalentes a  $50D_0$ , por lo que se consideró conveniente reportar la longitud aguas abajo donde el spray adquiere las características de un chorro libre en lugar de la longitud de penetración.

Antes de comentar los resultados obtenidos en cuanto a la distribución de velocidades y tamaños de gotas, en las figuras 2.8a y 2.8b se presentan gráficamente la distribución espacial de las muestras validadas para las velocidades y los diámetros: en ellas se puede ver un comportamiento prácticamente igual para ambos casos. Como es natural, en la región muy cercana a la boquilla ( $Z = 5\text{mm}$ ), el número de cuentas en la zona interna es muy pobre y se vuelve excelente en la zona de mezclado, fuera de ella, el número disminuye conforme se aleja de esta última; en las cercanías de la zona externa para valores de  $Z$  entre 5 y 25 se observa la misma tendencia anterior y una leve mejoría en la zona interna donde el spray sigue siendo muy denso, aguas más abajo, el número de cuentas mejora progresivamente obteniéndose un número aceptable de cuentas en toda la región de medición. Se observa claramente un comportamiento asimétrico, con números de cuentas más pequeños en la zona derecha que corresponde a la región posterior del spray que es la más alejada de la óptica receptora (ver figura 2.2), lo que indica el efecto adverso de la nube del spray en la medición. De acuerdo a la malla de medición, hasta un valor de  $Z = 30\text{mm}$ , se cubrieron la zona interna, la zona de mezclado y parte de la zona externa, entre  $Z = 30$  y  $90\text{mm}$ , se cubrió la zona interna y parcialmente la zona de mezclado, y a partir de  $Z > 90\text{mm}$ , solamente la zona interna.

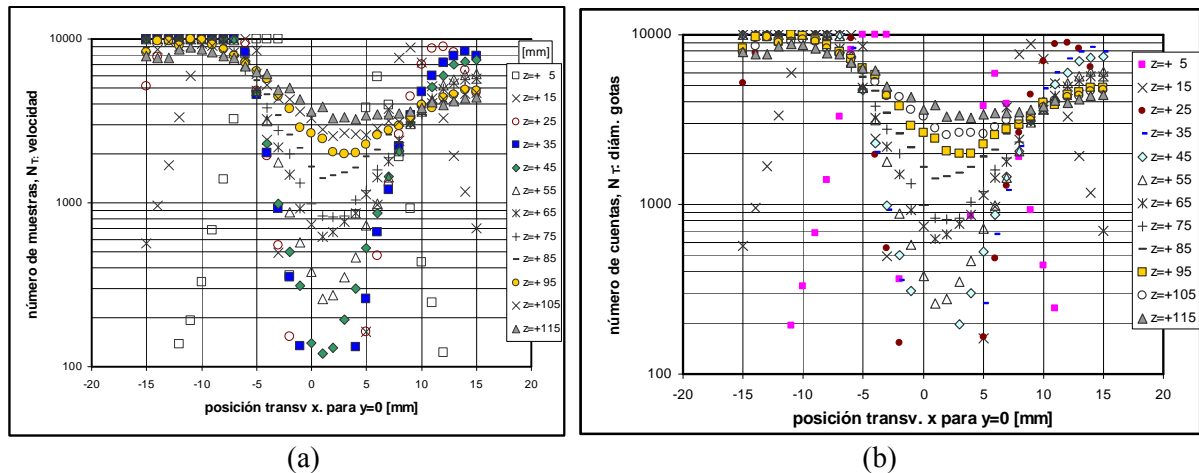


Figura 2.8. Número de muestras contadas por punto de medición: (a) velocidad, (b) diámetro de gotas

En la figura 2.9a se muestra la evolución espacial de la velocidad axial del spray. Inicialmente, éste sale de la boquilla con swirl en el sentido de las manecillas del reloj -visto desde abajo- lo que se puede inferir claramente al observar los perfiles de velocidad en forma de “M” hasta  $Z = 15\text{mm}$ , este perfil se mantiene y disminuye hasta desvanecerse en  $Z \sim 40\text{mm}$ , donde el perfil tiene una apariencia gaussiana; de la gráfica también puede notarse que la velocidad en el centro del spray aumenta en esa zona, hasta llegar a su valor máximo cuando  $Z \sim 45\text{mm}$ , *i.e.*  $L/D_0 \approx 20$ . Si se grafica la misma información de manera normalizada, utilizando para ese caso  $x^* = x/b$  como abscisa y para la velocidad adimensional  $v_z^* = v_z/v_{m\acute{a}x}$ , se puede notar en la figura 2.9b, que el perfil es básicamente el mismo dentro de un margen del 2.5% a partir de  $Z = 45\text{mm}$ .

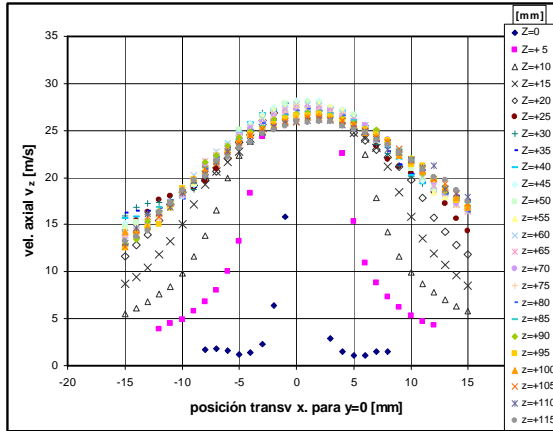


Figura 2.9a. Perfiles de velocidad axial.

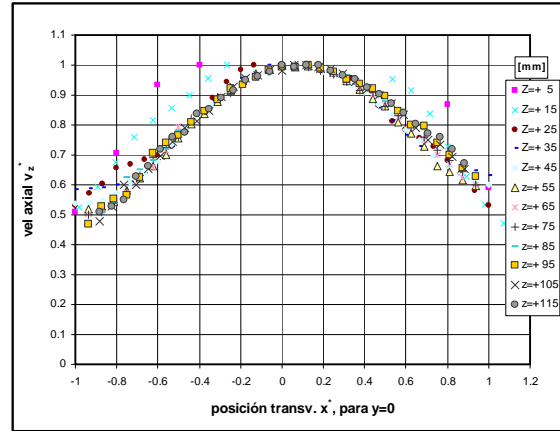


Figura 2.9b. Perfiles de velocidad axial normalizados

Como se mencionó, el PDA además de medir la componente de velocidad en la dirección axial, mide la velocidad en el plano normal a ese eje, sólo que esta componente está en dirección normal al plano formado por los haces con los que se determina la velocidad axial (ver figura 2.2) y se le dio el nombre de velocidad “tangencial” en este trabajo porque contiene información sobre la misma, aunque también sobre la velocidad radial del spray. En la figura 2.10, se muestran los resultados obtenidos de la evolución espacial de ésta y se observan cosas interesantes: en primer término, el cambio de signo en esta velocidad a partir del centro del spray ratifica la presencia de swirl en el flujo. A partir de  $Z = 15\text{mm}$ , se observa un doble cambio de signo a cada lado del centro que origina un perfil en forma de “Z” inclinada, esto puede indicar la presencia inesperada de un doble patrón de flujo, un remolino externo y otro interno girando en dirección opuesta al anterior. La región donde se presenta este efecto va desde  $Z = 15\text{mm}$ , intensificándose y llegando a un valor máximo en  $Z = 40\text{mm}$  y luego disminuyendo hasta prácticamente desaparecer en  $Z = 80\text{mm}$ . Con el fin de observar con mayor detalle las características del spray en la zona cercana a la boquilla, se realizó una medición fina para  $Z = 5\text{mm}$  y como resultado de ella, además de observar lo mencionado, se obtuvieron las componentes de velocidad en la dirección tangencial (a lo largo de la línea que pasa por el centro del spray y sigue la dirección de los haces) y la radial (en la línea normal a la anterior y que pasa por el centro del spray) las que se muestran en la figura 2.11.

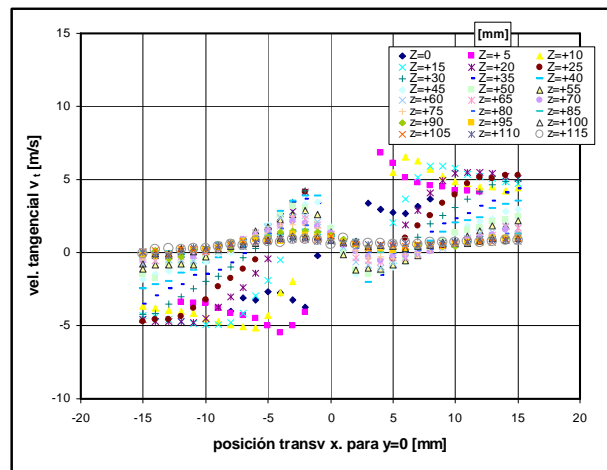


Figura 2.10. Perfiles de velocidad “tangencial”

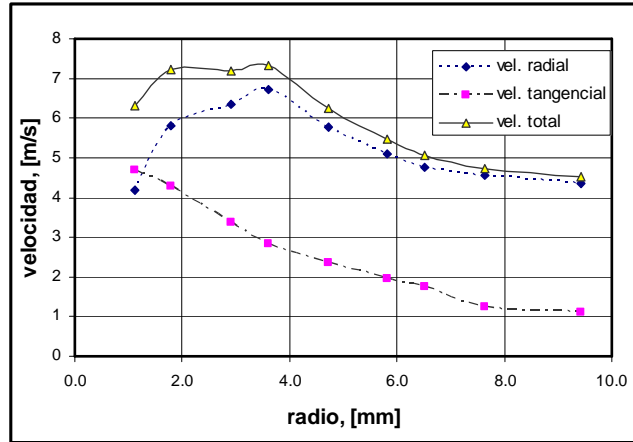


Figura 2.11. Perfil de velocidad radial y tangencial en  $Z = 5\text{mm}$ .

Junto con las mediciones de las componentes de velocidad axial y “tangencial”, se obtuvieron los valores RMS de ambas velocidades. Puede notarse de las figuras 2.12a y 2.12b la elevada actividad turbulenta que existe en el spray ya que para el caso del valor RMS axial alcanza valores máximos de  $\sim 7\text{ m/s}$  para  $Z = 40\text{mm}$  y de ahí disminuye monótonamente hasta alcanzar los valores mínimos en el extremo de la zona de medición, teniendo una intensidad más alta en los extremos y una mínima en el centro del spray pero siendo muy importante su valor en ese caso; por lo que corresponde a la RMS “tangencial” aunque con valores más reducidos, su impacto es mayor, ya que los mínimos que se alcanzan son más elevados que el valor medio, en este caso, el comportamiento es más intenso en el centro del spray y más débil en los extremos. En ambos casos se observa un comportamiento suave en esa región que podría ser modelado con facilidad.

Desde el punto de vista de la dinámica del flujo del spray se ve que éste alcanza un comportamiento gaussiano para  $L/D_0 \sim 20$  conservando energía turbulenta significativa aún a  $L/D_0 = 50$  que es el límite medido. Aunque se tienen valores muy pequeños de la componente “tangencial”, no ocurre lo mismo con su valor RMS que es un índice de la gran agitación que lleva el flujo.

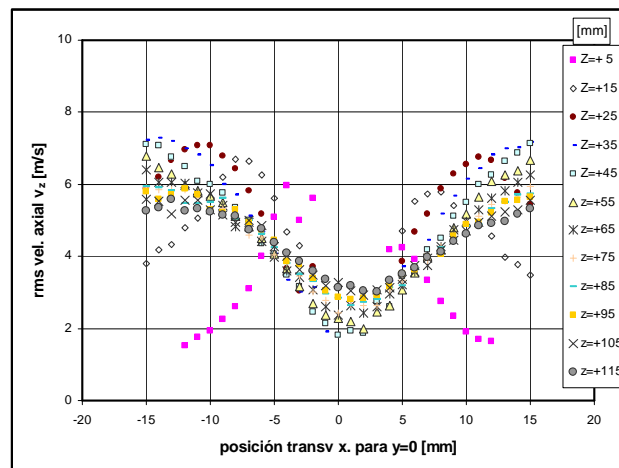


Figura 2.12a. RMS axial



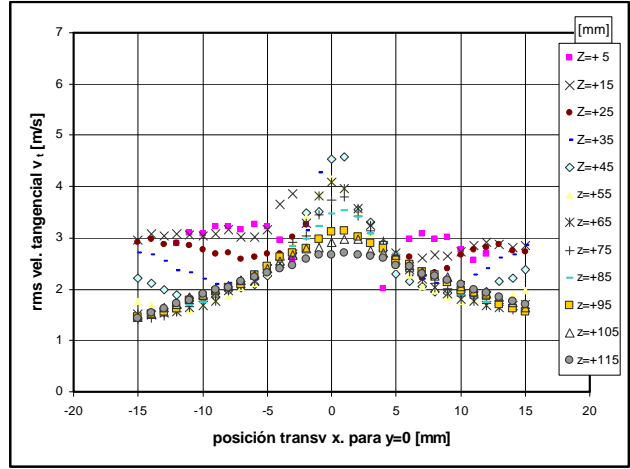


Figura 2.12b. RMS “tangencial”

La evolución espacial de la distribución de tamaños de gota del spray se muestra en las figuras 2.13 y 2.14, siendo la primera, para el diámetro medio aritmético de cada punto de medición y la última, para el diámetro Sauter. La evolución del  $D_{10}$  es mucho más suave que la del  $D_{32}$ , observándose para  $D_{10}$ , valores elevados solo en la región  $5 \leq Z \leq 35$  mm, después, todos los diámetros se distribuyen de igual forma, con valores máximos de  $D_{10} \approx 15$   $\mu$ m y en la región central de  $D_{10} \approx 10$   $\mu$ m. Si se relacionan estos resultados con las regiones macroscópicas del spray, los valores elevados ocurren en la región de mezclado y los más pequeños en la región interna; además, la parte suave de las curvas mencionadas cae en su mayoría en la región interna. Los valores y evolución de  $D_{32}$  muestran una dispersión mucho más elevada, nuevamente se observa que los mayores diámetros ocurren en una región muy cercana a la zona interna, pero fuera de ella, en la zona cercana a la boquilla y en tanto se aleja el spray de la misma, la tendencia es a tener valores más pequeños en la región central, creciendo levemente hacia los extremos, aunque se observa una mayor dispersión de los valores obtenidos.

En este caso los valores más uniformes se encuentran en los extremos y a partir de  $Z \sim 50$ , sin embargo, si se toma como criterio la mayor uniformidad en el tamaño de gota, esta se da a partir de  $Z \sim 100$ .

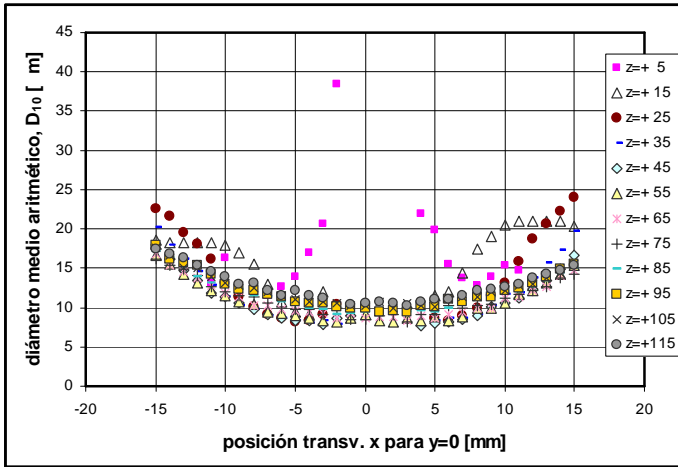


Figura 2.13. Diámetro medio aritmético ( $D_{10}$ )

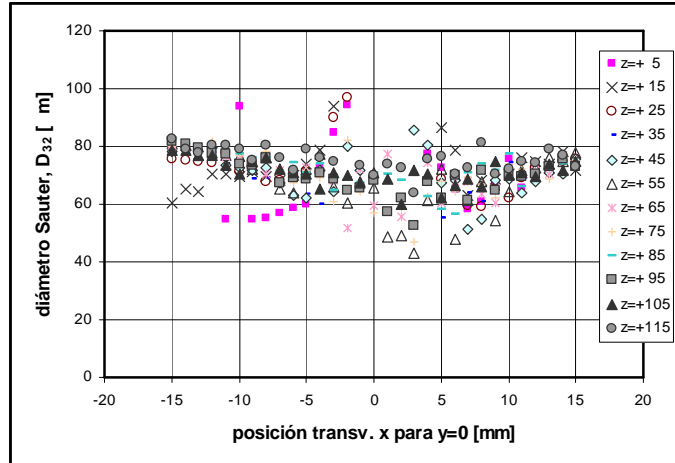


Figura 2.14. Diámetro Sauter ( $D_{32}$ )

#### 2.4.2. PIV-2D

Antes de efectuar las mediciones con PIV, con la ayuda de un micromanómetro, se determinaron las velocidades en un punto definido aguas abajo de la boquilla con el fin de obtener una relación entre la velocidad en ese punto, y la presión en el regulador; esto con el fin de conocer la presión necesaria para lograr el mismo número de Reynolds de los experimentos con PDA. Con base en estos resultados, se observó que el generador de humo utilizado, tenía problemas para alimentar las partículas al sistema, por lo que fue esto lo que finalmente definió el valor de la presión a utilizarse. Al compararse contra los resultados de referencia, el número de Reynolds,  $Re_{D_0}$ , fue de 2488.4 correspondiendo al 88.2% del de referencia, sin embargo, se consideró que el campo de flujo en estas condiciones era representativo de lo que se deseaba obtener, efectuándose todas las mediciones al valor mencionado. La figura 2.15, muestra la comparación entre la visualización que se puede lograr con el PIV, que muestra una toma instantánea (izquierda) de la zona iluminada, es decir, el plano central del spray, y la obtenida con una cámara regular que ilumina mas bien el contorno y con una velocidad de obturación varios ordenes de magnitud mayor.

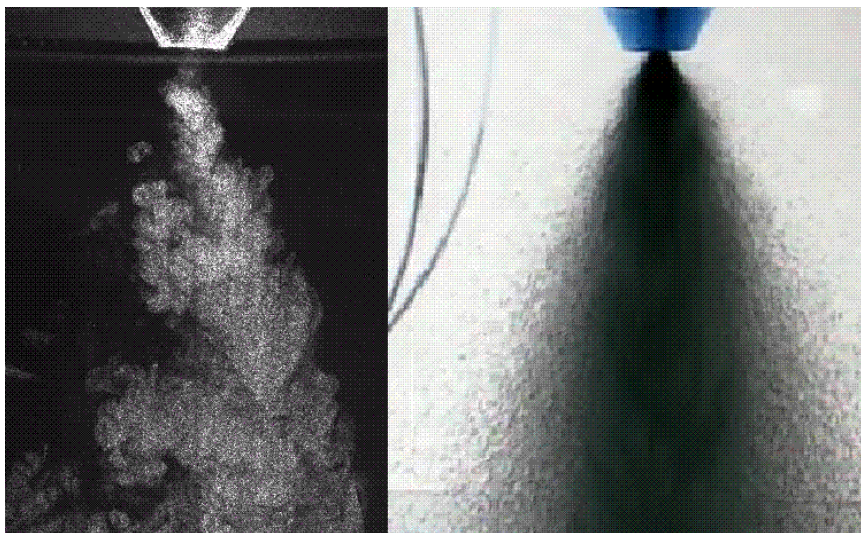


Figura 2.15 Visualización del spray con PIV (izq) y con cámara convencional (der.)

Con el fin de corroborar los resultados obtenidos con PDA, se preparó la instalación para determinar el campo de flujo en el plano central del spray a lo largo de la dirección axial. Los resultados se muestran en la figura 2.16, donde la concordancia con los obtenidos previamente con PDA son satisfactorios, tanto cualitativa como cuantitativamente. Para lograr estos resultados, se utilizó un total de 302 de pares de imágenes.

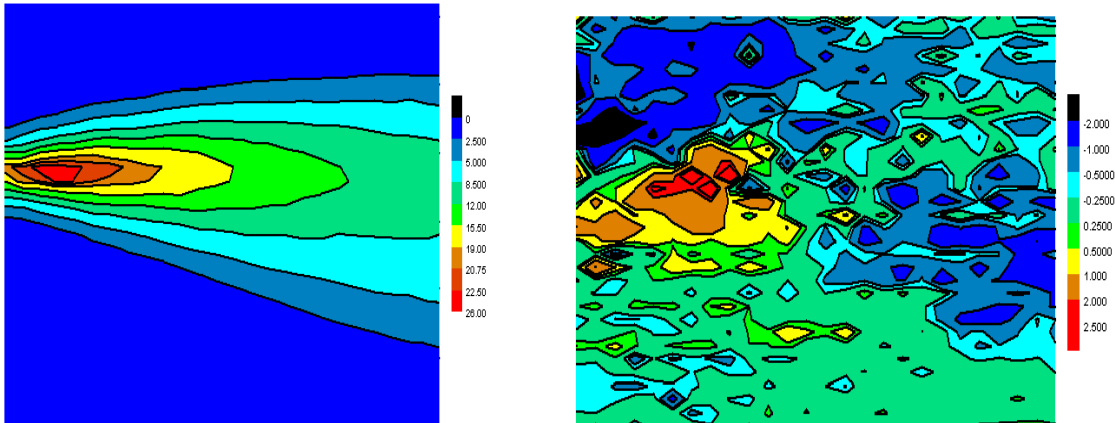


Figura 2.16. Campo de la velocidad axial  $u_z$  (izquierda) y de velocidad  $u_y$  (derecha)

Puede notarse en el campo axial que existe una pequeña caída del spray en la dirección axial provocada por las características del modelo empleado ya que el desalajo de la zona de medición se hizo por la parte inferior con la ayuda de una mampara y haciendo circular el aire hasta la zona inferior del punto de inyección. La parte derecha de la figura 2.16, muestra la componente vertical de la velocidad; se puede observar claramente en el mapa de colores, el efecto de inducción del aire hacia la zona del spray en la parte izquierda, y en la derecha, la predominancia del efecto del spray mostrando la velocidad hacia afuera, abriendo el mismo.

Una vez obtenido el campo de flujo en el plano axial, se modificó la posición del modelo de manera que el plano del láser se pudiera desplazar a lo largo del eje del spray (ver fig. 2.3, arreglo transversal), para determinar el campo en posiciones definidas a lo largo del eje  $z$ . Con base en los resultados obtenidos con el experimento inicial, se decidió utilizar un número similar de pares de imágenes, promediándose en este caso un total de 390 pares de imágenes para cada una de las 11 posiciones, desde  $Z = 40$  mm ( $L/D_0 = 17.4$ ), de la descarga de la boquilla, hasta  $Z = 140$  mm ( $L/D_0 = 60.9$ ) de la misma. La figura 2.17, muestra un mapa del campo de velocidad total en el plano transversal correspondiente a  $L/D_0 = 17.4$ . Además de ser asimétrico, muestra que las zonas donde la velocidad es máxima están separadas, lo que podría implicar la presencia de más de un vórtice. En las figuras 2.18 a 2.20, se muestran mapas de vectores de velocidad para  $L/D_0 = 17.4$ , 26.09, 34.8, 43.5, 52.2 y 60.9. A pesar de carecer del detalle deseado en la zona central, es evidente que cuando  $L/D_0$  se incrementa, es menor la influencia de un aparente segundo vórtice que tiende a desaparecer.

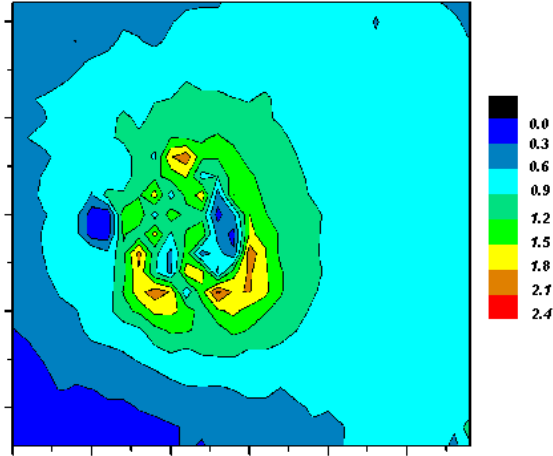


Figura 2.17. Campo de velocidad total promedio en un plano transversal a la boquilla en  $Z = 40$  mm. ( $L/D_0 = 17.4$ )

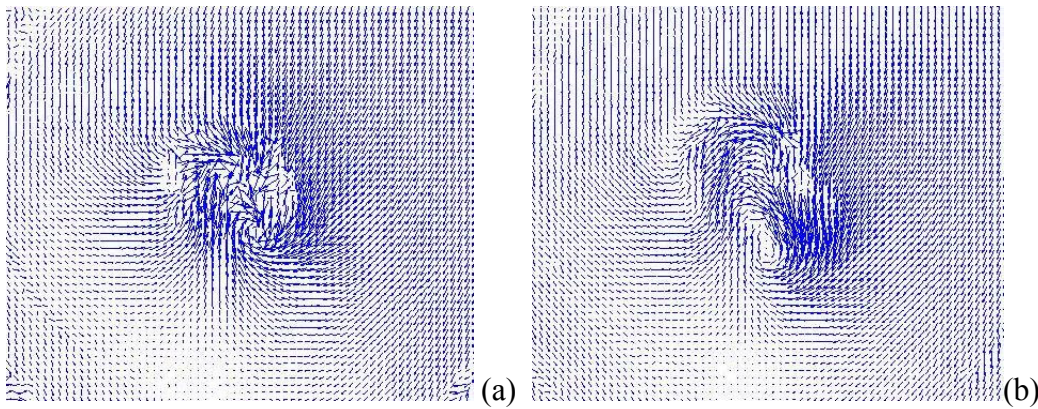


Figura 2.18. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla en  $Z = 40$  mm. ( $L/D_0 = 17.4$ ), (a) y  $Z = 60$  mm. ( $L/D_0 = 26.09$ ), (b).

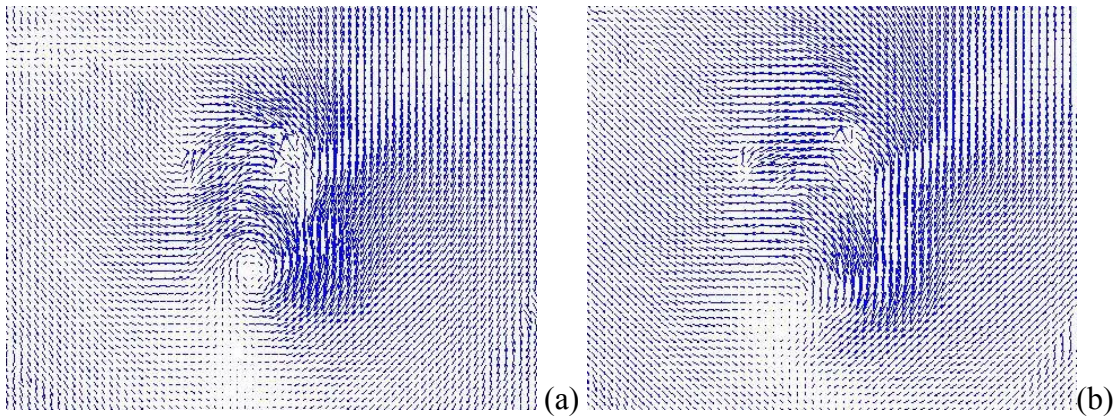


Figura 2.19. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla en  $Z = 80$  mm. ( $L/D_0 = 34.8$ ), (a) y en  $Z = 100$  mm. ( $L/D_0 = 43.5$ ), (b)

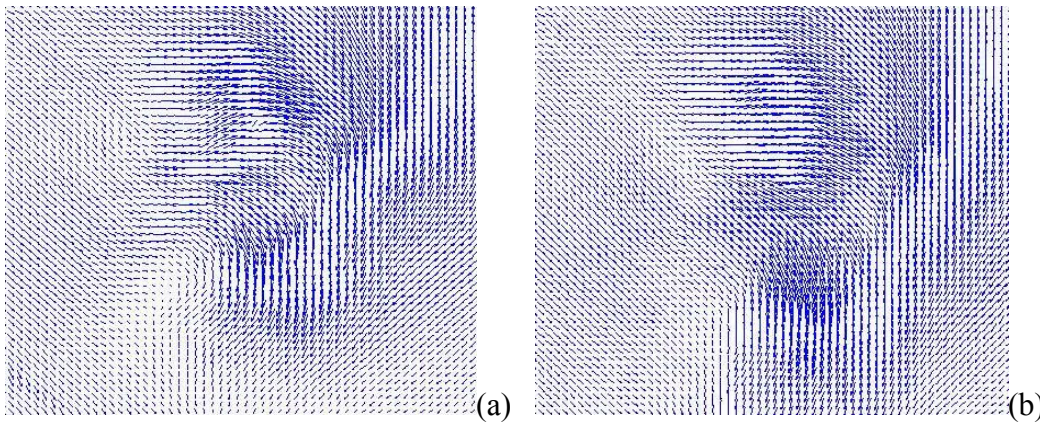


Figura 2.20. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla en  $Z = 120$  mm. ( $L/d_0 = 52.2$ ), (a) y  $Z = 140$  mm. ( $L/d_0 = 60.9$ ), (b)

Es evidente que los resultados obtenidos para el caso de los campos de velocidad promedio en los planos transversales no son muy claros, y sobre todo, no permiten establecer con precisión las características del flujo medio, es muy probable que esto se deba al número limitado de pares de imágenes utilizadas en el proceso para un campo complejo como el que se intentaba conocer, contrastando con el número de muestras utilizadas para cada punto en el caso de PDA (~10000). Entonces, si bien se pueden obtener características generales de todo un plano, los valores promedio sufren de una falta de datos que sustenten ese valor. A pesar de ello, el análisis de los pares de imágenes que producen campos instantáneos en un plano dado, sí dan una buena idea de lo que ocurre. En la figura 2.21, se muestra un conjunto de 6 campos de velocidad instantáneos para el caso en que  $L/D_0 = 17.4$  ( $Z = 40$  mm.). Aunque no están totalmente secuenciados, son muy representativos de lo que ocurre dentro y fuera del spray: puede notarse que se ven con claridad estructuras de remolinos en cada uno de ellos y estas estructuras cambian muy rápidamente; revisando los campos instantáneos generados, es posible medir desde 2 ó 3 vórtices en algunos casos, hasta 7 u 8 en otros, es decir una gran actividad del flujo dentro del spray lo que ayuda al mezclado y distribución de las gotas, se observa al mismo tiempo, el efecto del aire que se induce al spray. El uso de esta información requiere de un análisis complementario de los datos obtenidos, mismo que no se incluyó en este trabajo. Si se desea obtener mayor confiabilidad en la información adicional, se debería contar con un número significativamente mayor de pares de imágenes, lo que no fue contemplado.

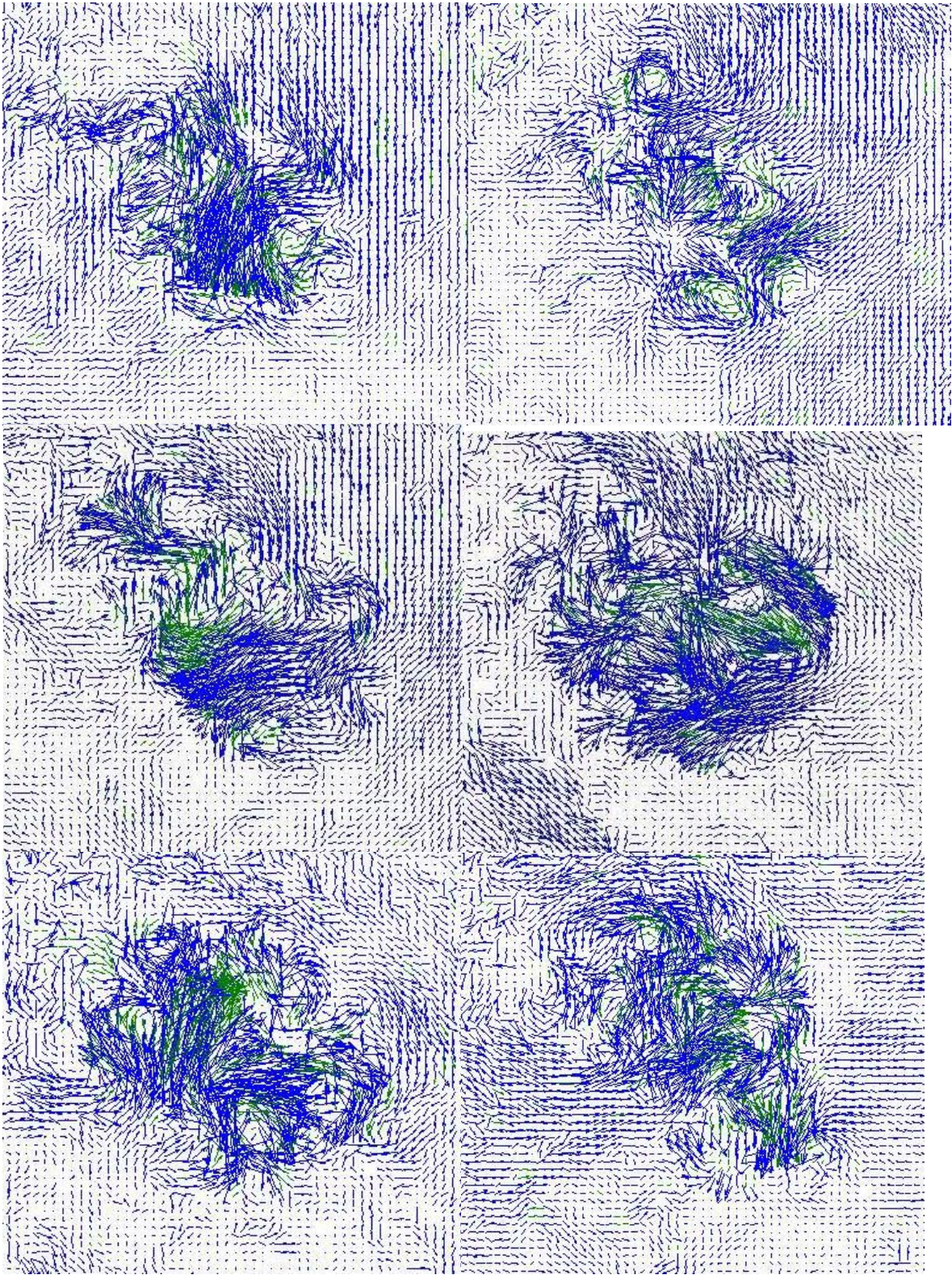


Figura 2.21. Campos de velocidad instantáneos en un plano transversal a la boquilla en  $Z = 40\text{mm}$ , ( $L/D_0 = 17.4$ )

### 2.4.3. PIV-3D

El paso de PIV-2D a PIV-3D fue una consecuencia natural ya que se contaba con la infraestructura para ello, así que tomando en cuenta los resultados obtenidos con PIV-2D, se instaló y configuró la instalación experimental para obtener el campo tridimensional, se intentaba al mismo tiempo, mejorar lo obtenido con 2D, por lo que para este caso, se incrementaron significativamente el número de pares de imágenes para cada experimento, pasando del promedio de 390 pares de imágenes para los experimentos realizados con PIV-2D en el arreglo transversal, a un promedio de 790 pares de imágenes para cada cámara, esto necesariamente generó una cantidad enorme de espacio ocupado en la memoria, es decir, del orden de 3 GB por cada evento (plano) estudiado, y un total para toda la fase 3D de más de 30 GB de memoria ocupada, solamente para los experimentos en planos transversales a la dirección principal del flujo. Las condiciones en las que se obtuvieron los campos 3D, fueron las mismas que las usadas en los experimentos con 2D, ( $Re_{D0} = 2488.4$ ).

En la figura 2.22 se muestran los resultados obtenidos para el perfil de velocidad axial con PDA para una posición muy cercana a la salida de la boquilla, apenas  $Z = 5$  mm, (a) y (b), en los que se consideró que la cantidad de cuentas era pobre, pero a pesar de ello, el perfil obtenido fue muy razonable, y en la figura 2.22 (c) se combinaron los resultados obtenidos con PIV-3D y los mostrados en las figuras (a) y (b). En esa figura (que se presenta también en la figura 2.23 (a)), se muestra la extensión del campo medido con PDA y el obtenido con PIV-3D. Es evidente la falta de detalle causada por las características intrínsecas de las cámaras CCD y la combinación de éstas, con las áreas de interrogación utilizadas.

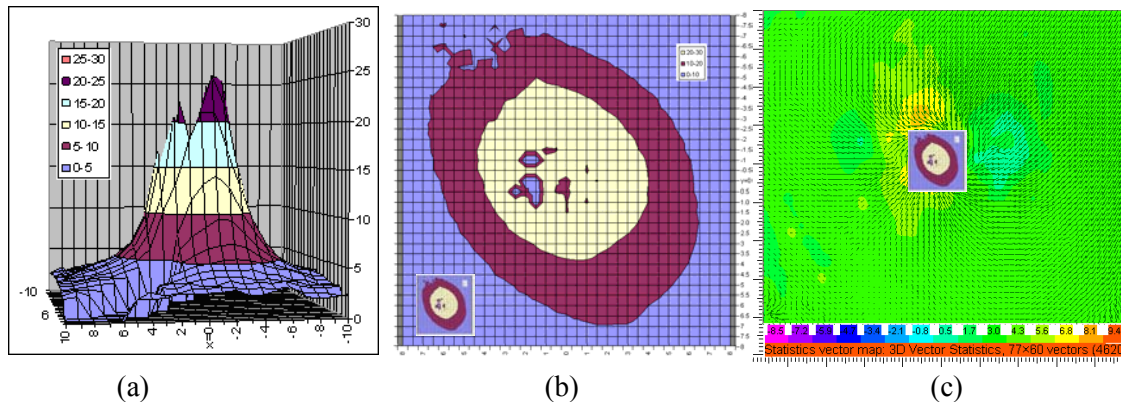


Figura 2.22 Campo de velocidad axial  $u_z$  para  $Z=5$ mm (a y b)-PDA, y (c)  $u_z, u_r, u_\theta$  con PIV-3D

En las figuras 2.23 a 2.25, se muestran los campos de velocidad 3D para los planos localizados en  $Z = 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120$  y  $140$  mm, respectivamente. En  $Z = 20$  mm, se observa muy poco detalle del campo axial, notándose dos zonas donde la velocidad es más elevada en la región cercana al perímetro de la boquilla; las figuras para  $Z = 30$  y  $40$  mm, muestran una región anular que implica un perfil en forma de “M” típica en la zona cercana a la boquilla. A diferencia de los resultados obtenidos con PDA (fig. 2.9a), la región central de baja velocidad parece extenderse más allá de  $Z = 40$  mm, pero esto en ambos casos puede ser causado por la baja resolución, en el caso de PDA por la elevada densidad de gotas en la parte interna, y en el de PIV por la resolución asociada a las áreas de interrogación. Después de ese valor, se observa que los

perfiles de velocidad axial tienen un máximo en el centro, lo que implicaría que tienden a ser gaussianos. Es muy evidente que el spray producido está achatado, teniendo una forma más bien elíptica que circular. Esto se veía desde las mediciones con PDA (fig. 2.23(b)), sin embargo, no fue posible obtener más perfiles detallados con PDA en regiones donde las señal hubiese sido mucho más limpia.

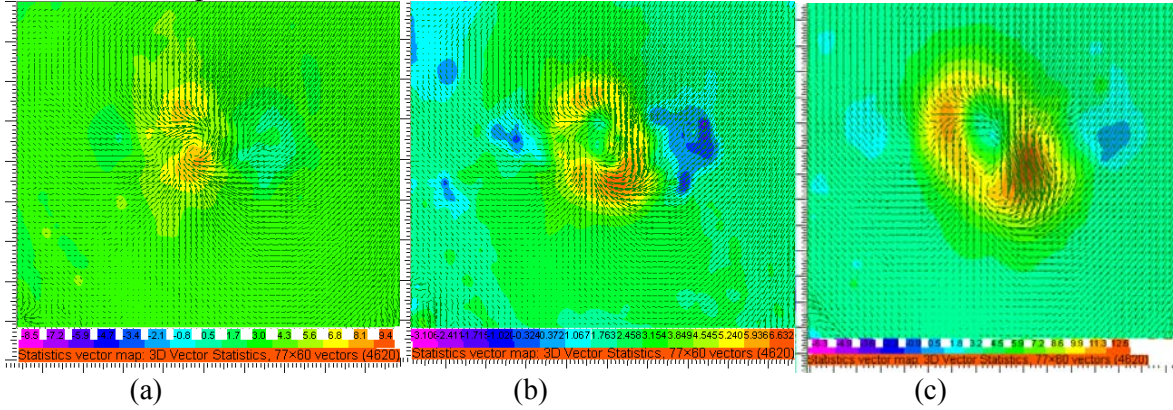


Figura 2.23 Campo de velocidad 3D para (a)  $Z=20\text{mm}$ , (b)  $Z=30\text{mm}$ , (c)  $Z=40\text{mm}$ , con PIV-3D

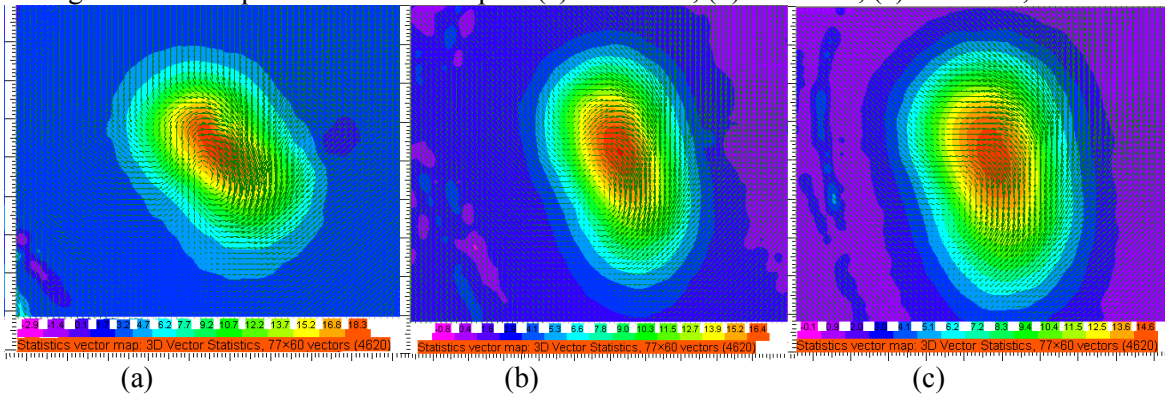


Figura 2.24 Campo de velocidad 3D para (a)  $Z=60\text{mm}$ , (b)  $Z=80\text{mm}$ , (c)  $Z=100\text{mm}$ , con PIV-3D

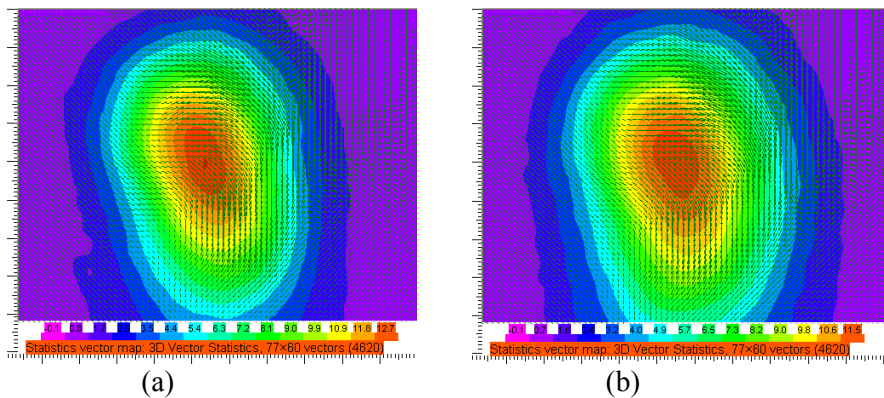


Figura 2.25 Campo de velocidad 3D para (a)  $Z=120\text{mm}$ , (b)  $Z=140\text{mm}$ , con PIV-3D

#### 2.4.4. Comparación entre PIV-2D y PIV-3D

En la figura 2.26, se muestran nuevamente los perfiles de velocidad obtenidos con PIV-2D, la primera mostrando el campo de velocidad en la dirección axial  $u_z$ , y la segunda, la componente en dirección vertical  $u_y$ ; en la figura 2.27, se muestra el campo 3D para el plano a lo largo del eje



axial ubicado en dos posiciones: la primera muy cercana al eje central del flujo ( $x = -2$  mm), y la segunda a una distancia lateral  $x = -20$  mm. La información de la imagen 2D solo muestra la componente vertical, indicando las zonas donde hay inducción del aire y las zonas donde el spray se expande, mientras que las imágenes 3D muestran como vectores el flujo en la dirección normal al plano (que no se notan muy claramente) y el campo combinado en dirección axial-vertical. Es claro el efecto de giro que se presenta en el spray causado por la inducción del aire. Existe una gran similitud entre las imágenes 2D y 3D.

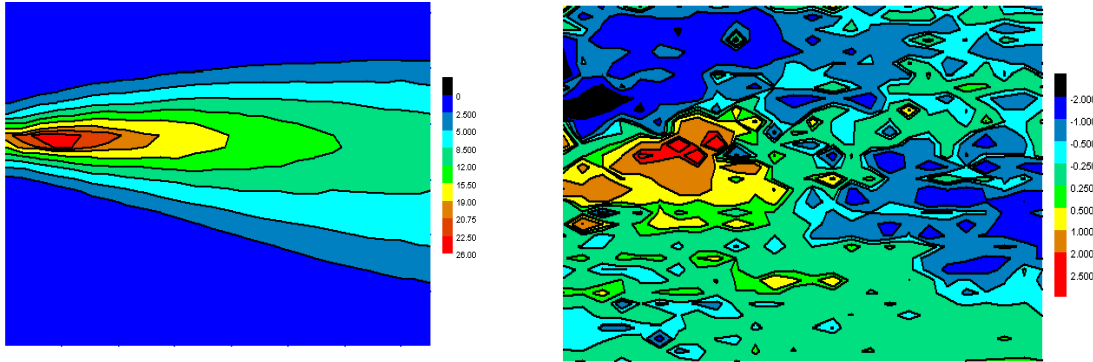


Figura 2.26. Campo de la velocidad axial  $u_z$  (izquierda) y de velocidad  $u_y$ , (derecha), PIV-2D

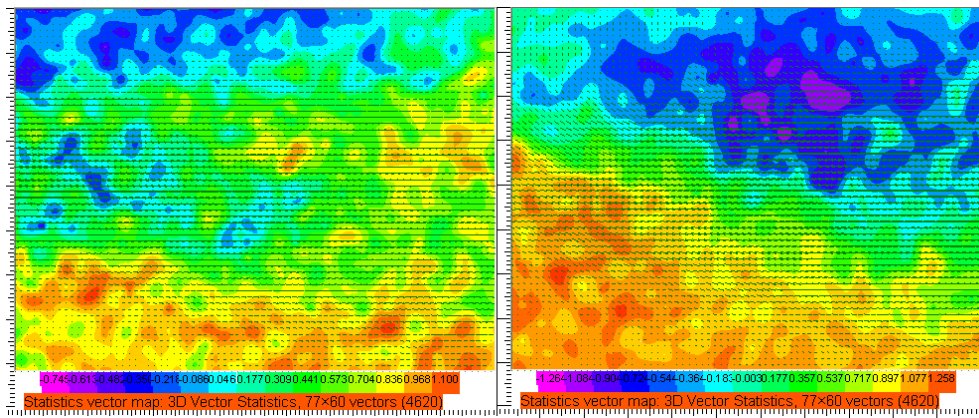


Figura 2.27. Campo de la velocidad 3D para  $x = -2$ mm (izquierda) y  $x = -20$ mm (derecha), PIV-3D

La interpretación de las imágenes en esta posición es significativamente más difícil que cuando se analizan los campos 3D ubicando el plano de luz en dirección transversal al flujo principal, por lo que esos fueron los presentados en las figuras 2.22 a 2.25.

Para contrastar eso resultados con los obtenidos previamente con PIV-2D, las figuras 2.28 a 2.35, muestran simultáneamente los campos obtenidos.

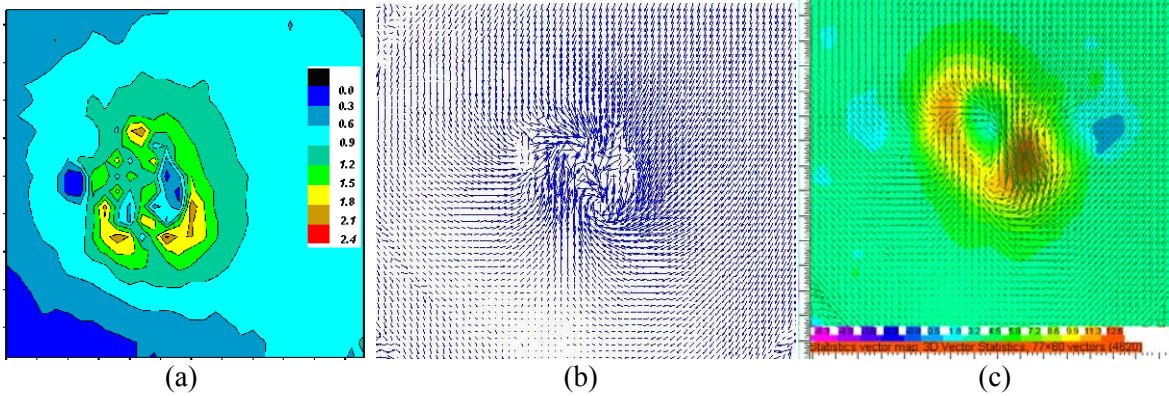


Figura 2.28. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla en  $Z = 40$  mm. ( $L/D_0 = 17.4$ ), (a) módulo de la velocidad en el plano; (b) mapa de vectores, piv-2D; (c) campo 3D, PIV-3D.

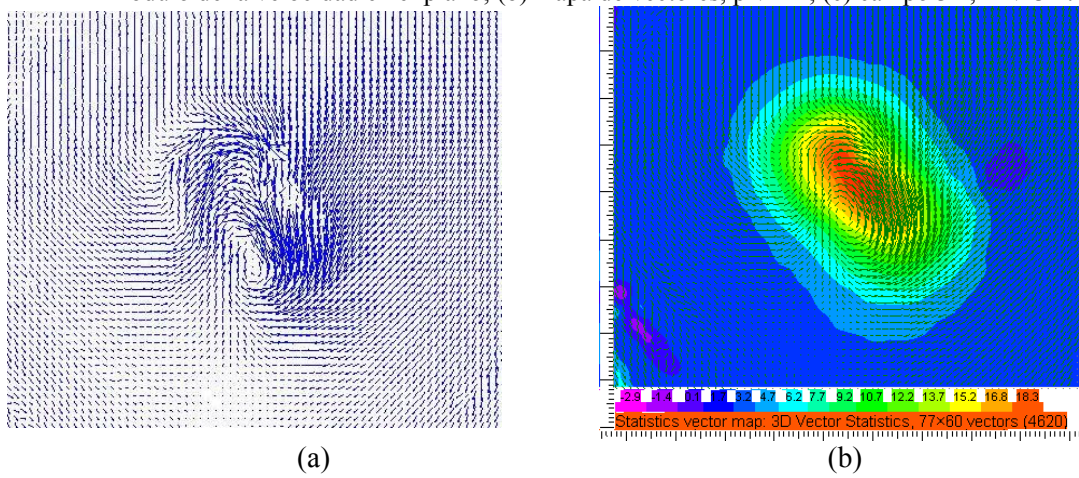


Figura 2.29. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla  $Z = 60$  mm. ( $L/D_0 = 26.09$ ), (a) 2D con PIV-2D; (b) 3D con PIV-3D.

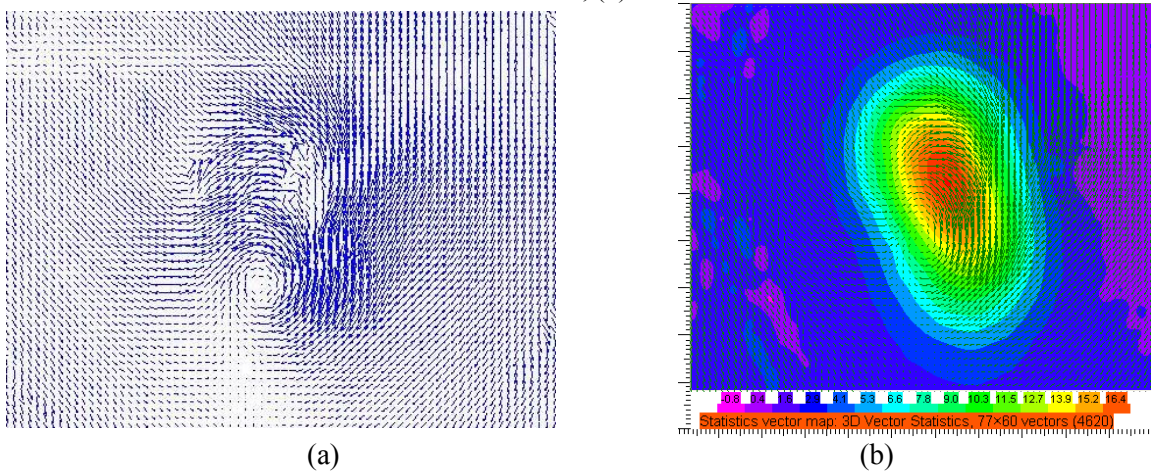


Figura 2.30. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla  $Z = 80$  mm. ( $L/D_0 = 34.8$ ), (a) 2D con PIV-2D; (b) 3D con PIV-3D.

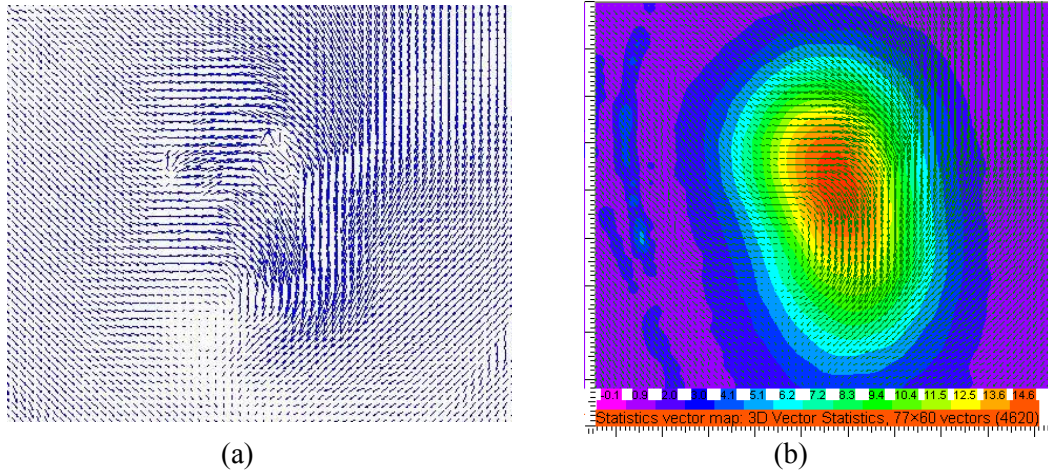


Figura 2.31. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla  $Z = 100$  mm. ( $L/D_0 = 43.5$ ), (a) 2D con PIV-2D; (b) 3D con PIV-3D.

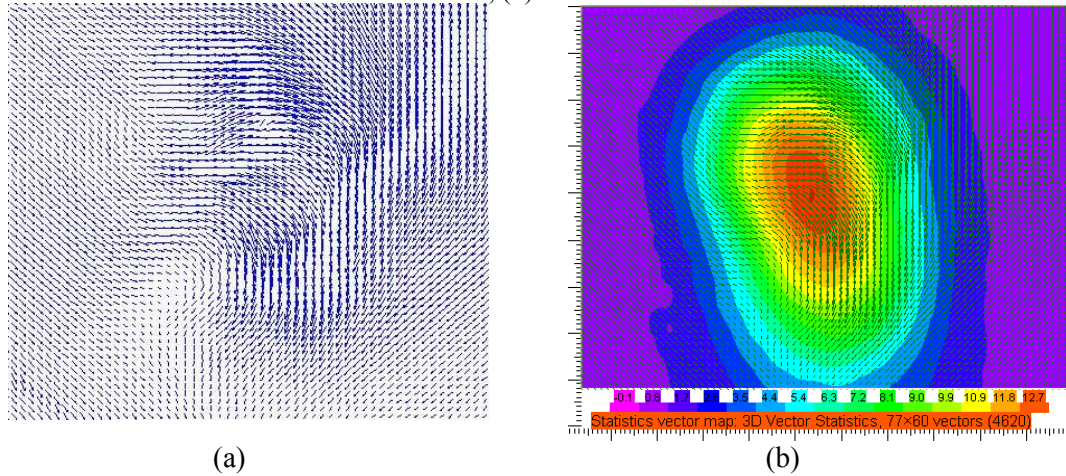


Figura 2.32. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla  $Z = 120$  mm. ( $L/D_0 = 52.2$ ), (a) 2D con PIV-2D; (b) 3D con PIV-3D.

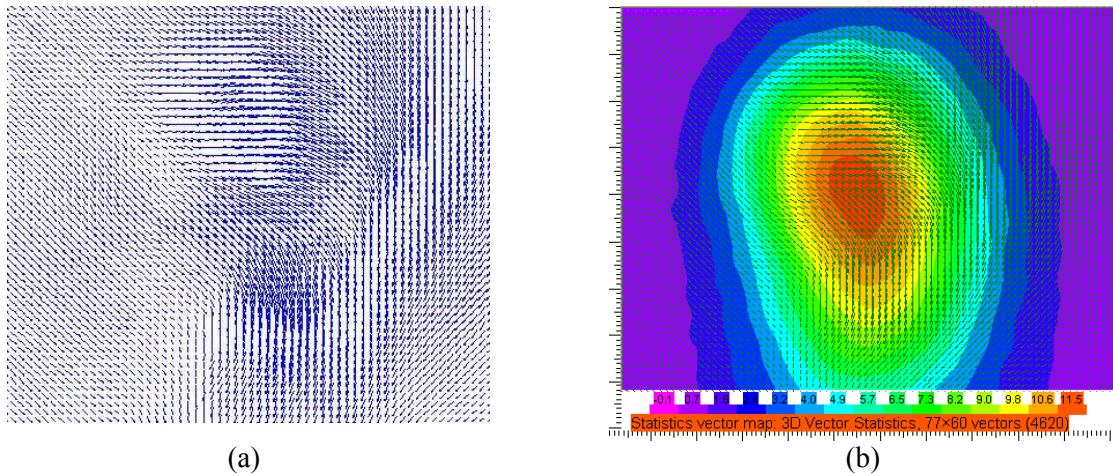


Figura 2.35. Campo de velocidad promedio en un plano transversal a la boquilla  $Z = 140$  mm. ( $L/D_0 = 60.9$ ), (a) 2D con PIV-2D; (b) 3D con PIV-3D.

Puede notarse en todas las figuras que los campos obtenidos con PIV-2D muestran una gran semejanza con los obtenidos con PIV-3D. Como se comentó, aunque existe una gran cantidad de información relativa a los campos 2D y 3D, se decidió no continuar más allá de lo aquí presentado.

## 2.5. Conclusiones

### 2.5.1. PDA

A pesar del alcance limitado de este estudio, se pudo obtener información valiosa acerca del comportamiento de la boquilla de atomización. Aunque no se puede obtener más detalle en la zona cercana a la descarga de la boquilla que confirme que se encuentra en el régimen de atomización y no se presentan en consecuencia porciones o ligamentos, los valores indicativos de números de Reynolds, Weber y Ohnesorge permiten suponer que así es, ya que estos se refieren a condiciones más sencillas que las que existen en el experimento. Los valores medidos confirman esta aseveración, aunque eso no logra superar la limitación del equipo cuando se trata de sprays densos. Es necesario seguir buscando una técnica que resuelva este problema. En cuanto al conocimiento sobre la estructura del spray, se observa el papel que juega el swirl en la evolución de la distribución del tamaño de gotas, sólo existen gotas grandes en una región cercana a la descarga de la boquilla y los valores máximos se dan en el centro del spray donde la velocidad en la dirección transversal al flujo es prácticamente nula, esto puede explicar porqué el tamaño es mayor en ese punto y en el extremo, donde la velocidad media y la RMS “tangencial” son más pequeñas. La discrepancia entre las formas suaves de la distribución de tamaños de gotas  $D_{10}$  y la mayor dispersión en el caso de  $D_{32}$  se explica más bien en función de la menor calidad en la señal en la región central, si se aceptan todos los diámetros medidos en esa región, la tendencia de los datos de baja validación es aceptable. Puede notarse que la mayor influencia en la distribución del tamaño de gotas se puede deber a la interacción turbulenta ya que a partir de que el perfil de velocidad ha alcanzado su mayor valor para  $\sim 20D_0$ , a partir de ahí, en lugar de tener  $D_{32}$  más grandes que en los extremos la tendencia se revierte y este efecto disminuye lenta-mente conforme  $Z$  crece hasta que en  $\sim 45D_0$  el perfil aparentemente se estabiliza con valores en el centro de 75  $\mu\text{m}$  y 80  $\mu\text{m}$  en los extremos. A pesar de ser una tendencia clara de la distribución de tamaños de gotas  $D_{32}$ , existe una dispersión importante causada muy probablemente por la turbulencia. La diferencia en tamaños en la región lejana está asociada a la menor velocidad de la zona externa lo que podría llevar a la coalescencia de gotas produciendo el patrón observado. Es claro que el trabajo se queda muy corto en cuanto a poder definir con todo detalle estos eventos pero a pesar de ello se obtiene información relevante del mismo.

### 2.5.2. PIV

A pesar del alcance limitado de este estudio, se pudo obtener información adicional que complementa las mediciones con PDA. A diferencia de lo que se puede percibir directamente del spray, existe un claro achatamiento en la forma del perfil de velocidades axial, éste aparecía ya en el campo medido con PDA en una zona muy cercana a la descarga de la boquilla; esa forma se amplifica aguas abajo donde el perfil tiene una forma más bien elíptica, sin embargo, solo se percibió cuando se utilizó la técnica de PIV-3D. Es evidente que con relación al interés principal de este trabajo, se pudo obtener más detalle del campo de flujo, es claro que la boquilla utilizada produce en principio una cantidad definida de filamentos vorticosos que se desarrolla aguas

abajo pero que están fluctuando de manera intermitente, por lo que solamente se pueden ver cuando coinciden con el disparo de la cámara CCD. La presencia de un segundo vórtice en las imágenes promedio parece ser más bien causado por el número limitado de pares de imágenes, es decir, el flujo tendría una apariencia más uniforme si se hubieran utilizado más imágenes, aunque esto no pudo demostrarse en este caso, todo esto en el caso de las mediciones efectuadas con PIV-2D. Cuando se utilizó la técnica de PIV-3D, incrementando al doble el número de pares de imágenes, los resultados no fueron muy distintos a los previamente obtenidos, lo que podría indicar entonces que así es el flujo, o que son necesarias aún más pares de imágenes; esta pregunta quedó sin respuesta. En cuanto al uso de la técnica para el análisis de sprays, su principal virtud es la de poder ver planos completos con estructuras complejas, pero con el límite intrínseco de las zonas definidas, es decir, no se pueden resolver escalas más pequeñas. Es importante señalar que cuando se tienen estructuras complejas es de fundamental importancia determinar el número adecuado de pares de imágenes si se desean obtener conclusiones firmes sobre el campo, si bien la solución trivial no es aplicable de manera práctica porque llevar un experimento a miles de pares de imágenes implica un incremento sustancial en la capacidad requerida para su almacenamiento, y aún más trabajo para la manipulación de los archivos en una etapa de post procesamiento.

De cualquier manera, la información contenida en este capítulo utilizando combinadamente las técnicas de PDA, y PIV en 2D y 3D, da una imagen general de un spray, tanto en la distribución espacial de los tamaños de gotas involucrados, como de las características de sus campos de velocidad axial y transversal.

## **Capítulo 3. Análisis de Mezcladores.**

### **3.1. Introducción.**

Entre las actividades a realizar para lograr el objetivo planteado en el proyecto de investigación, una muy relevante fue la de definir, con base en la cantidad de emulsión necesaria en el proceso de atomización, las características del sistema a utilizar al pasar, de la fase de producción en laboratorio de emulsiones muestra, a una producción mucho mayor. Se definió entonces, que esto podría llevarse a cabo ya sea en producción continua, o en lotes de decenas de litros de los componentes, mediante el uso de mezcladores Rushton acoplados en tándem (serie). Este planteamiento generó la necesidad de analizar el sistema de mezclado al variar las condiciones dentro del mezclador causadas por los cambios en las propiedades de los fluidos, principalmente el efecto viscoso, y el causado por la separación entre los rotores, para identificar las condiciones de operación más apropiadas. Con este fin, se definió un modelo en acrílico a fin de llevar a cabo las visualizaciones y experimentos necesarios que condujeran al objetivo, las primeras, para obtener información cualitativa que ayudara a acotar el problema y enseguida, el desarrollo experimental con anemometría de imágenes de partículas en dos dimensiones (PIV-2D), para obtener los campos de velocidades de un conjunto de dos rotores Rushton en la cámara de mezclado en función del número de Reynolds del mezclador y de la distancia entre ambos, cuando existe además, un flujo pequeño a través del mezclador, esto es, poder definir las dimensiones generales, el número de rotores y su ubicación dentro de la cámara.

Para caracterizar las zonas de interés en el mezclador, se programaron y efectuaron experimentos para observar las siguientes efectos: posición relativa del primer rotor, influencia de la separación entre rotores en el comportamiento, influencia del cambio significativo en las características del fluido, tiempo total de residencia en el mezclador, posición relativa del rotor en el extremo superior del mezclador.

### **3.2. Instalación Experimental.**

Para el desarrollo de los experimentos planteados, se construyó una instalación experimental consistente del modelo en acrílico de cavidad cilíndrica mencionado, con cámara de mezclado de geometría (altura) variable en la que se pudiera ajustar de manera simple el paso entre rotores, un conjunto de dos rotores accionados por un motor eléctrico, con ajuste de velocidad mediante un variador de frecuencia, y los dispositivos adicionales para el control y recirculación del fluido. La parte externa del modelo se construyó con caras planas, para evitar problemas ópticos con el uso del haz láser. El control de la velocidad angular de los rotores se hizo mediante un variador de frecuencia comercial acoplado al motor eléctrico, mientras que el control del gasto y recirculación del fluido se logró mediante un circuito cerrado accionado por una pequeña bomba centrífuga, lográndose el gasto deseado con una válvula de aguja aguas arriba del mezclador. Las posiciones de la válvula para los gastos y temperaturas de operación se obtuvieron previamente calibrándose por aforo, y verificándose antes de cada experimento. Para determinar los campos de velocidad en la zona de interés, se utilizó la técnica de velocimetría de imágenes de partículas en dos dimensiones (PIV-2D), con un equipo compuesto de un láser pulsado de doble cavidad de 200 mJ, con un haz de 532 nm y lente cilíndrico para producir la cortina de luz, una cámara CCD de 1024×1280 píxeles conectada al adquisidor y procesador de datos (FlowMap System HUB) a través de un módulo sincronizador, y la configuración y operación de todo el sistema mediante una PC con el software de análisis. El posicionamiento preciso de la cortina del láser y la cámara se dio con la ayuda de una mesa de coordenadas XYZ, manipulada también desde la PC. En la figura 3.1, se muestra un esquema de la instalación experimental. Buscando una solución alterna a las partículas comerciales para

seguir adecuadamente el flujo en el aceite utilizado, un aceite hidráulico comercial ISO VG 68, se encontró que para las condiciones de los experimentos programados, resultó una buena solución generar burbujas de aire aguas arriba de la bomba mediante la caída por gravedad en un recipiente -que al mismo tiempo separaba las más grandes-; aunque su tamaño no fue determinado, su comportamiento fue suficientemente satisfactorio durante los experimentos. En la figura 3.2, se muestran los parámetros involucrados en el análisis y la región de interés que se reporta en los resultados.

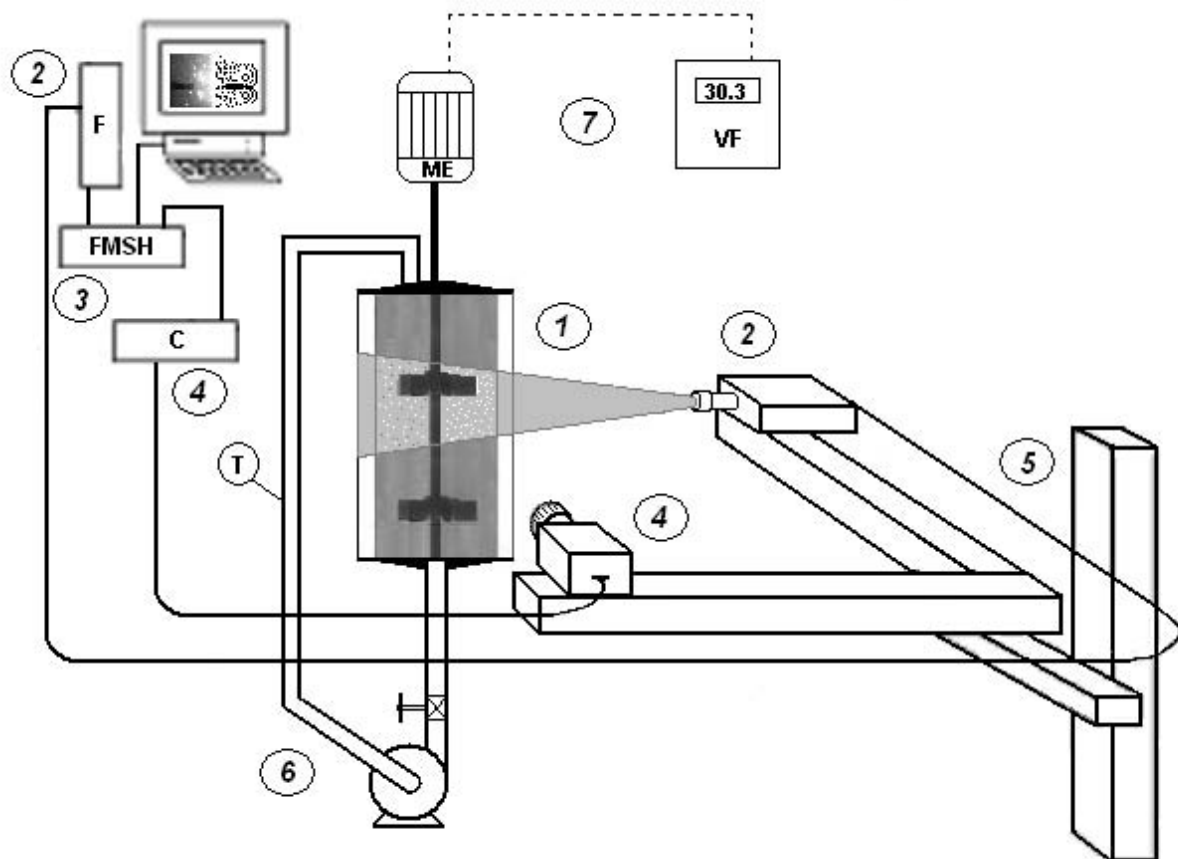


Fig. 3.1. Esquema de la instalación experimental

donde

1. Modelo, zona de medición
2. Láser pulsado Nd:YAG doble cavidad y fuente (F), 532 nm (cortina verde), 200 mJ
3. Unidad de procesamiento FlowMap System Hub® (FMSH)
4. Cámara Hisense CCD 1024×1280 y unidad de sincronización con láser (C)
5. Mesa de coordenadas XYZ controlada desde PC
6. Circuito de bombeo y producción de burbujas
7. Sistema motriz con variador de frecuencia (VF)
8. PC con Software Flow Manager® de procesamiento de datos

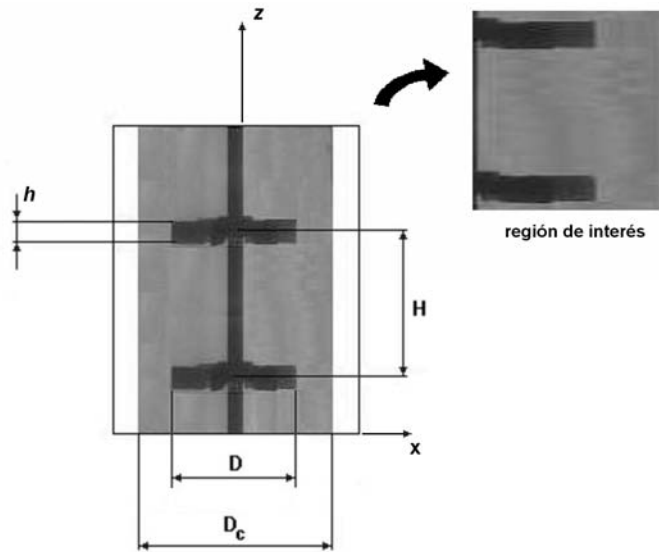


Fig. 3.2. Parámetros y coordenadas del mezclador

Además del equipo empleado, se definieron los siguientes puntos: fluido a utilizar, caracterización del fluido, sistema de recirculación del fluido, caracterización del sistema motriz, partículas para visualización y medición del campo de flujo.

- Fluido a utilizar. De acuerdo con las características de las emulsiones deseadas, se buscó un fluido que pudiera modelar -siguiendo las leyes de semejanza- las condiciones de operación en un rango cómodo de viscosidad y régimen de giro, con lo que finalmente se decidió que el fluido apropiado bajo esas condiciones fuera un aceite hidráulico ISO VG 68. Las condiciones de diseño que sirvieron para definir las características del sistema experimental se muestran en la tabla 3.1. Por las características ópticas de los fluidos, se deseaba usar un fluido transparente que hubiera facilitado la experimentación, sin embargo, el uso de agua o soluciones de agua y glicerina fueron descartadas por las condiciones que se requerían en el sistema. La tabla 3.2, muestra algunos fluidos y condiciones resultantes en el sistema experimental.

Tabla 3.1. Condiciones de diseño

Concepto	Cond. Emulsión	Unidades
Flujo	0.0139	kg/s (50kg/h)
Densidad	950	kg/m <sup>3</sup>
Gasto	1.4632E-05	m <sup>3</sup> /s
Diámetro rotor	0.064	m
Espesor rotor	0.01	m
Viscosidad din.	5.00E-01	kg/ms (0.5 Pas)
Velocidad angular	400-800	rpm (800)
	104.72	rad/s



Tabla 3.2. Fluidos y condiciones de operación de algunos fluidos considerados

FLUIDO	Visc [Pa·s]	Vel. angular [rpm]	Gasto [mlpm]
Emulsion	0.5	800	877.9
SAE 30	0.2	357.5	390
SAE 20	0.125	223.5	246
SAE 10	0.065	116.3	129
<b>Aceite hidráulico ISO VG 68 @ 26°C</b>	<b>0.126</b>	<b>215.2</b>	<b>237</b>
Etilenglicol	0.0199	35.6	39
Agua	0.001	5.87	6.48

- Caracterización del fluido utilizado. Para reproducir las condiciones de diseño con el fluido elegido teniendo en cuenta los cambios provocados que éste sufra en su viscosidad por los cambios en la temperatura del medio ambiente y del calentamiento por fricción, se caracterizó su comportamiento con la ayuda del Reómetro Haake RS150 del Laboratorio de Sistemas de Combustión (LSC). La figura 3.3, muestra el comportamiento de la viscosidad del fluido modelo con la temperatura.

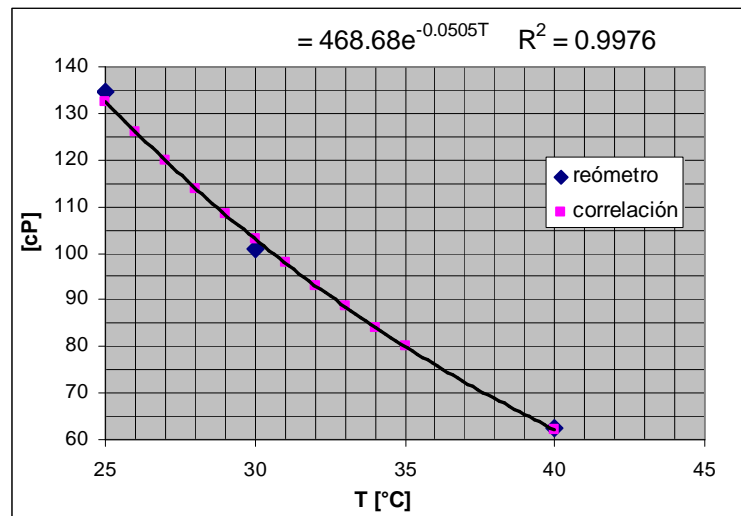


Figura 3.3. viscosidad dinámica del aceite ISO VG68

- Sistema de recirculación del fluido. Se eligió una pequeña bomba centrífuga para el bombeo del aceite y el control del gasto mediante una válvula de aguja. Después de determinar el tamaño de la bomba, se optó por una pequeña bomba de plástico de 30W de potencia, los que estaban sobrados de acuerdo con el cálculo efectuado. La operación de la misma en el sistema fue adecuada pero por problemas de calentamiento de su motor, se le acopló un sistema de enfriamiento con una línea de aire que permitió utilizarla con éxito durante toda la fase experimental.
- Caracterización del sistema motriz. Con el fin de conocer los puntos de ajuste en el variador de frecuencia para obtener las condiciones de los experimentos programados, se eligió una relación de poleas apropiada del sistema motriz y se procedió a obtener la curva de rpm contra Hz del sistema con ayuda de un tacómetro óptico digital Cole-Parmer del LSC. La figura 3.4, muestra la curva obtenida.

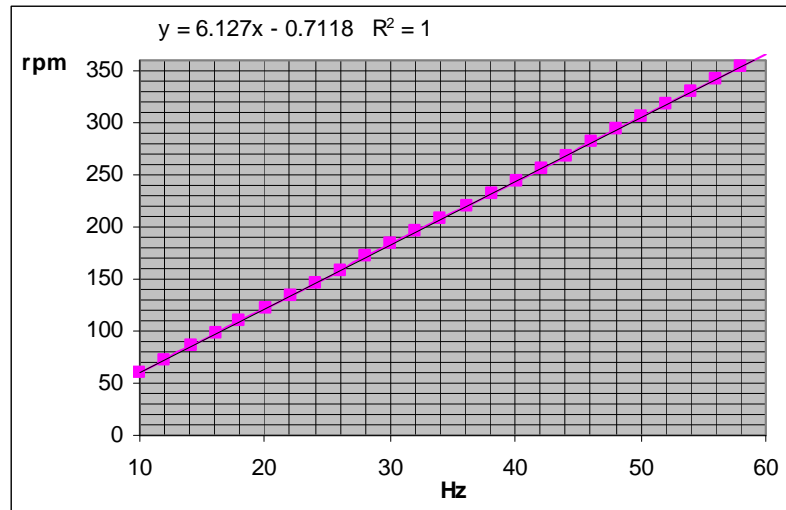


Figura 3.4. Comportamiento del sistema con variador de frecuencia

- Partículas para visualización y medición del campo de flujo. Para llevar a cabo la fase preliminar de visualización del comportamiento del mezclador, se decidió utilizar partículas relativamente grandes, para que pudiesen verse con facilidad. Se utilizó polvo de vidrio comercial que se usa en actividades manuales. Para la fase experimental se tenía contemplada la utilización de partículas comerciales por el proveedor del equipo (partículas recubiertas de plata). Por la necesidad de continuar la fase experimental, ésta se realizó finalmente utilizando partículas de vidrio finamente molido y, principalmente, burbujas de aire generadas por caída libre en el depósito de retorno del sistema de recirculación. En el siguiente apartado se reportan con más detalle las dificultades y solución aplicada.

### 3.3. Análisis.

De acuerdo con el objetivo planteado, la instalación experimental permite el análisis del comportamiento en la cámara de mezclado en condiciones de un flujo continuo de líquido permitiéndose al mismo tiempo variar el régimen de giro. De esta forma, las variables de control del experimento son  $Q$  y  $\omega$ , y las variables de interés por determinar son: la componente de velocidad radial  $u$ , la componente de velocidad axial  $v$  y el módulo de la velocidad total  $V$ , permaneciendo constantes el resto de los parámetros con excepción de la distancia  $H$  entre rotores. Con el fin de reproducir las condiciones en el mezclador dinámico de la planta piloto, es imprescindible escalar los resultados mediante los parámetros adimensionales relevantes, éstos se identifican en la siguiente sección.

#### *Grupos adimensionales*

Con base en las variables involucradas y de acuerdo con la teoría de modelos, e.g. teorema y método Buckingham para la obtención de parámetros adimensionales, se identifican los siguientes grupos

$$V/D = (D^2/\omega, Q/D^3, h/D, H/D, D/D_c) \quad (1)$$

en donde se ha planteado como el grupo dependiente, al que involucra la velocidad producida por el rotor en el interior de la cavidad, y los grupos adimensionales independientes son el número de Reynolds, el coeficiente de gasto, la relación de aspecto del rotor, y el paso adimensional entre rotores, por lo que la ecuación anterior se escribe también como (omitiendo los grupos que permanecen constantes,  $h/D = 0.203$  y  $D/D_c = 0.525$ ).

$$C_V = (Re_D, C_q, P) \quad (2)$$

Con  $Re_D = D^2/\nu$ ,  $C_q = Q/D^3$ ,  $P^* = H/D$ , definidos como el número de Reynolds del mezclador, el coeficiente de gasto y el paso, respectivamente.

De manera análoga, se pueden definir los parámetros siguientes:

$$C_u = u/D \quad (3)$$

$$C_v = v/D \quad (4)$$

para incluir a las componentes de velocidad en la dirección radial (x)  $u$  y axial (z)  $v$ , respectivamente.

### 3.4. Resultados.

De la fase cualitativa se obtuvo principalmente la información general de las zonas de influencia de los rotores, principalmente en lo que ocurre en la zona de entrada, aguas arriba del primer rotor, y en la zona de descarga, aguas abajo del último rotor. Se observó que en la zona de succión del primer rotor tiende a aparecer una zona de baja velocidad cuando la distancia de este rotor a la entrada a la cámara es de un diámetro del rotor y disminuye con la misma; en cuanto a la zona por encima del último rotor, es clara la influencia de éste del orden de un diámetro del mismo. Esta información permitió dirigir la fase experimental incluyéndose experimentos que verificaran lo observado, y acotando al mismo tiempo los experimentos.

#### 3.4.1. Visualización, puesta en marcha y experimentos preliminares.

El objetivo era obtener información que ayudara a definir con más precisión la fase experimental, esta información cualitativa, permitió entre otras cosas, observar zonas de baja velocidad en la parte inferior del mezclador cuando la separación entre el fondo y el primer rotor era un diámetro del mismo, lo que condujo a establecer una distancia más corta para esa zona. Cualitativamente se observó también que la zona de influencia del último rotor es del orden de un diámetro, sin embargo, se consideró que la zona más crítica es la zona inferior en virtud de que ahí está entrando la preemulsión a la cámara. Otra información importante fue el observar las zonas toroidales generadas por los rotores, localizadas a los lados de cada rotor y cercanas a la zona de descarga radial de los mismos. Para la fase cuantitativa, se definió utilizar las partículas que ofrece comercialmente Dantec. Inicialmente, se consiguieron partículas de poliamida de 20  $\mu\text{m}$  que se utilizan normalmente con agua en experimentos de PIV pero surgió un problema inesperado cuando éstas, al incorporarlas al fluido, se tornaron invisibles para las cámaras a causa de la probable similitud del índice de refracción en combinación con el aceite, o algún otro efecto no determinado, por lo que la solución se dirigió hacia otro producto que ofrece Dantec, en este caso, partículas de vidrio recubiertas de plata, las cuales no estuvieron disponibles cuando se tenía lista la fase experimental. Con el fin de resolver de alguna forma la carencia de partículas para la fase experimental, se intentó salvar el problema mediante la creación de

partículas de vidrio, obteniéndose por molienda, el problema en este caso fue el no poder lograr tamaños uniformes, pero principalmente se obtuvieron partículas demasiado grandes lo que no dio los resultados que se deseaban al seguir adecuadamente el flujo. Siguiendo el trabajo con los elementos que se tenían a la mano, se reanudó la fase experimental con las partículas de vidrio molido, con resultados no tan buenos como se necesitaba, pero la solución surgió prácticamente sola: Mientras trataban de obtenerse tamaños más apropiados con las partículas de vidrio, en el curso de los experimentos se observó que además de éstas, había burbujas dentro de la cámara que funcionaban bien en cuanto a tamaño y seguimiento del flujo por lo que se decidió inyectar aire mediante una boquilla en el depósito de la succión; sin embargo, los resultados en todos los esquemas intentados fueron malos. Finalmente, se observó que los mejores resultados se daban simplemente con la caída del chorro de descarga al tanque de succión siempre y cuando se colocara a una altura adecuada y en conjunto con una apertura de la válvula de aguja mucho mayor a la correspondiente al gasto de las condiciones experimentales. Esta combinación producía gotas de diversos tamaños pero la gran mayoría de tamaños no deseados se descartaba simplemente por la acción del propio sistema, es decir, las burbujas grandes no lograban superar la tubería de succión por el efecto de flotación de las mismas y las que lograban ser succionadas por la bomba, eran de tamaños mucho más pequeños. Se observó que la respuesta de estas burbujas era adecuada, siendo de tamaños más pequeños que las partículas de vidrio incorporadas.

Aunque no se determinó el tamaño de las burbujas utilizadas, éstas tuvieron las siguientes características:

- Visualmente eran arrastradas por el flujo.
- Su tamaño aparente era menor o igual al de las partículas de vidrio producidas. Se estima un tamaño medio del orden de 50  $\mu$ m.
- Mejor que las dos condiciones anteriores, fue que la respuesta de éstas al sistema PIV fue muy aceptable. Solamente hay que agregar que las partículas no prevalecen por mucho tiempo, por lo que hay que estarlas renovando una vez que se nota una baja en los mapas de vectores válidos o que empiecen a aparecer vectores no esperados por su magnitud. De todas formas el factor más relevante para interrumpir un experimento no fueron las partículas sino la elevación de la temperatura del aceite causada principalmente por la temperatura del medio ambiente.

Con la solución al problema de las partículas, se concluyó la puesta en marcha y a punto del sistema experimental, complementándose con la generación de la información necesaria para operar el sistema en función de la temperatura del aceite modelo por ser ésta, una condición impuesta a la que había que ajustarse. La tabla 3.3, muestra los parámetros de operación del sistema a diferentes temperaturas del aceite. En la tabla, las columnas 1 a 6 se explican por sí mismas; en la columna 7 los segundos son los necesarios para captar 100 ml del aceite para lograr el gasto requerido; las columnas 8 a 11 corresponden a los Hz necesarios para lograr los casos definidos y la última columna corresponde a la posición de la válvula en una escala arbitraria de referencia para reproducir las condiciones. En las figuras 3.5 y 3.6, se muestran los gráficos de comportamiento del sistema en cuanto a régimen de giro, gasto y frecuencia en el variador como función de la temperatura de aceite, en la figura 3.7, se muestra el comportamiento de la válvula en función del gasto del sistema.

Tabla 3.3. Parámetros de operación en función de la temperatura del aceite modelo.

T [°C]	Aceite modelo ISO VG	[Pa.s]	[cSt]	rpm	Mlp m	t seg	1.0H z	0.8Hz	0.6Hz	0.4Hz
25	68@25°C	0.1345	151.1	229.7	252.0	23.808	37.6	30.08	22.56	15.04
26	68@26°C	0.1260	141.6	215.2	237.0	25.316	35.24	28.192	21.144	14.10
27	68@27°C	0.1199	134.7	204.7	225.0	26.666	33.52	26.816	20.112	13.41
28	68@28°C	0.1140	128.1	194.7	216.0	27.777	31.89	25.512	19.134	12.76
29	68@29°C	0.1080	121.3	185.0	205.2	29.239	30.31	24.248	18.186	12.12
30	68@30°C	0.1030	115.7	176.0	195.0	30.77	28.84	23.072	17.304	11.54
31	68@31°C	0.0979	110.0	167.2	183.6	32.68	27.4	21.92	16.44	10.96
32	68@32°C	0.0931	104.6	159.0	176.4	34.01	26.07	20.856	15.642	10.43
33	68@33°C	0.0885	99.4	151.2	168.0	35.714	24.8	19.84	14.88	ND
34	68@34°C	0.0842	94.6	143.7	158.4	37.877	23.57	18.856	14.142	ND
35	68@35°C	0.0800	89.9	136.6	150.0	40	22.41	17.928	13.446	ND
40	68@40°C	0.0626	70.3	106.9	117.6	51.02	17.56	14.048	10.536	ND

### 3.4.2. Experimentos con PIV-2D.

#### Programa Experimental

Una vez establecidas las variables de interés y estando lista la instalación para la fase experimental, se definieron los experimentos a realizar en dos bloques: el primero para ver los efectos de los rotores en la zona de succión y descarga y de esta manera obtener las dimensiones de éstas zonas. En el segundo bloque, se programaron los experimentos para lograr el objetivo principal, es decir, definir la geometría buscada y al mismo tiempo ver el efecto en el cambio en las condiciones de diseño, principalmente las causadas por las variaciones en la materia prima. Desde el diseño conceptual del sistema experimental, se habían contemplado solamente 2 rotores por lo que el análisis de la información permitiría determinar si era necesario incrementar el número de éstos en función del tiempo de residencia en el mezclador. En la tabla 3.4 se muestran genéricamente los experimentos planeados para el primer y segundo bloque. Los valores de  $Re$  generados en los experimentos fueron de 40%, 60%, 80%, 100% y 150% del número de Reynolds correspondiente a las condiciones de referencia ( $Re_D = 650$ ) y los de  $H/D$  de 1.0, 1.5 y 2.0.

Tabla 3.4. Variables experimentales

programa experimental	variables que se modifican	
	I	II
bloque		
$H_1/D$	SI	NO
$H/D$	NO	SI
$H_2/D$	SI	NO
$Re$	SI	SI
$C_q$	NO	SI

Una variable adicional involucrada en los experimentos -que fue necesario incluir en todo el análisis- fue la temperatura ambiental, que junto con el calentamiento producido por el motor de la bomba produjeron un cambio en las condiciones del aceite empleado, teniéndose que definir con anticipación las condiciones de velocidad, gasto, apertura de válvula para cada experimento realizado, de manera que se produjeran los valores de  $Re_D$  deseados. En la tabla 3.5, se muestra entre otras, la temperatura del aceite como parámetro inicial para definir las condiciones de gasto y régimen de giro para el experimento planteado; se puede observar una diferencia de 6 °C entre las temperatura mínima y máxima utilizadas. Como en todo experimento, el control de las variables, repetibilidad y disminución del error son muy importantes para obtener resultados confiables: en cuanto a control la incertidumbre en la medición de la temperatura y gasto fue de 3.5%, con una repetibilidad entre experimentos de 98.5% y un error asociado a las mediciones de menos del 10% por la baja cantidad de muestras tomadas (un total de 11500 en 77 eventos), sin embargo, los aspectos cualitativos del comportamiento y los valores cuantitativos se consideraron más que satisfactorios para el objetivo de proyecto. Regresando a la tabla 3.5, de los 14 casos principales reportados en ella, la variación de los parámetros independientes (variables de control) dio como resultado un rango de variación de 3.81 y 4.84 veces para  $C_q$  y  $Re_D$ , respectivamente, lo que sitúa el valor del  $Re_D$  por debajo del crítico (10000) para flujo turbulento en este tipo de casos (Bartels et al. [77]). La tabla muestra en las tres últimas columnas información sobre el coeficiente de velocidad que se discutirá más adelante. Para la obtención de las gráficas presentadas en las figuras 3.8 a 3.11, se tienen las siguientes observaciones: el campo visual de la cámara abarcó en todos los casos hasta el 97% de la región de interés para evitar el exceso de luz causado por el haz en el acrílico que producía una señal muy pobre y no confiable; para evitar uno de los problemas típicos causados por los materiales ópticos en PIV, la parte externa del modelo era plana dejando solamente el efecto interno de la cámara cilíndrica lo que produce una deformación en la dirección x, misma que fue necesario corregir; para cubrir la zona de interés en la dirección axial era necesario mover la cámara axialmente y así obtener imágenes parciales que al combinarlas, cubrieran todo el campo; en todos los casos para evitar los problemas intrínsecos a los bordes (pérdida de señal, vectores espurios) este corrimiento se hizo con un traslape importante entre campo y campo (35% mínimo), obteniéndose resultados satisfactorios.

Tabla 3.5. Parámetros utilizados y obtenidos

$p^*$	temp [°C]	Q [m <sup>3</sup> /s]	$C_q$ Q/ D <sup>3</sup>	Re D <sup>2</sup> /	$C_v$ v <sub>r</sub> / D	≤ 5% $C_v$ [%]	≤ 10% $C_v$ [%]
1.0	28	0.0000036	1.1E-03	389.5	0.458	7.1	15.3
1.0	31	3.05E-06	8.3E-04	520.0	0.475	3.3	13.7
1.0	30	3.25E-06	6.7E-04	652.0	0.494	2.9	10.1
1.5	29	1.464E-06	7.3E-04	258.5	0.302	3.3	11.6
1.5	30	1.474E-06	5.1E-04	390.2	0.329	1.8	8.7
1.5	33	2.392E-06	7.2E-04	519.7	0.346	1.4	5.8
1.5	32	2.94E-06	6.7E-04	652.0	0.379	1.7	5.9
1.5	34	5.00E-06	7.8E-04	1052.8	0.402	1.0	8.7
1.5	34	4.038E-06	5.3E-04	1252.1	0.375	1.6	7.8
2.0	32	1.313E-06	7.6E-04	259.4	0.281	7.2	21.4
2.0	30	1.683E-06	5.9E-04	388.4	0.346	5.0	18.7
2.0	33	2.408E-06	7.3E-04	521.3	0.352	3.1	12.4
2.0	29	3.42E-06	6.7E-04	653.7	0.393	2.3	8.5
2.0	32	4.776E-06	7.1E-04	1002.5	0.385	2.0	11.3

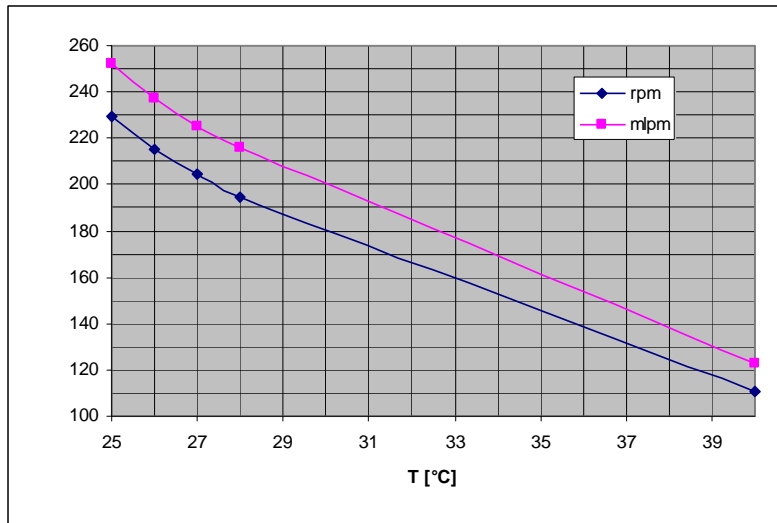


Figura 3.5. Velocidad y el gasto en el sistema en función de la temperatura del aceite

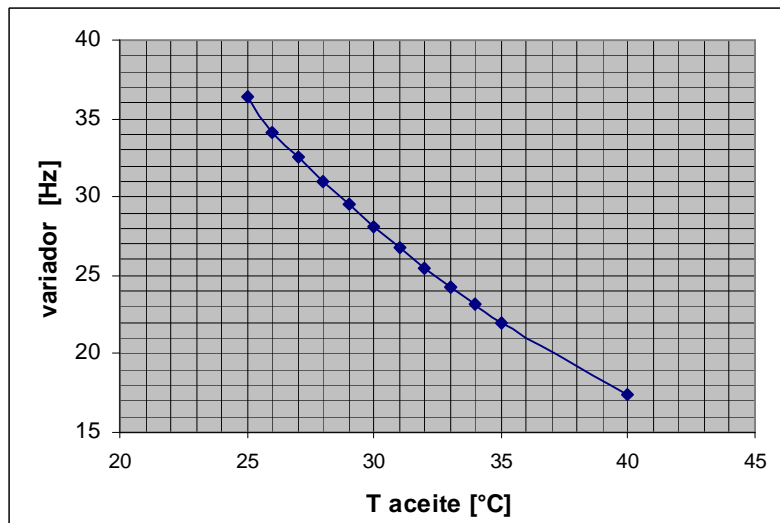


Figura 3.6. Frecuencia en variador en función de la temperatura del aceite

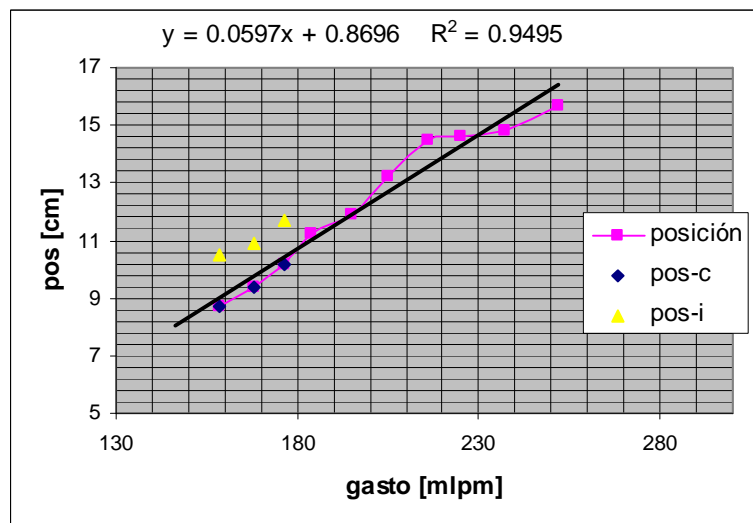


Figura 3.7. Posición de la válvula en función del gasto del sistema

La generación de los mapas de vectores a partir de los pares de imágenes se hizo utilizando la imagen completa de 1280x1024 píxeles, utilizando correlación adaptativa y 50% de traslape en las áreas de interrogación, posteriormente, un tratamiento de promedios locales, y los mapas de vectores resultantes usando exclusivamente vectores válidos; todas ellas rutinas del software utilizado (FlowManager). Las imágenes mostradas fueron generadas con un mínimo de 2800 puntos -correspondiendo este número a los experimentos con  $P^* = 1.0$ , *i.e.*, el campo más reducido-, cubriendo la zona de interés (la zona comprendida a la derecha de la flecha y el 97% del borde en la dirección horizontal, y la distancia entre los dos rotores más la correspondiente al ancho de la paleta y un poco más allá de ésta), ver Fig. 3.2. Todas las figuras muestran coeficientes de velocidad  $C_u$ ,  $C_v$ , o  $C_V$ , según sea el caso.

La figura 3.8, muestra los campos de velocidad, de la componente de velocidad  $u$ , de la componente  $v$ , y el módulo de la velocidad total  $V$ , de izquierda a derecha, respectivamente cuando  $P^* = 1.5$  y  $Re_D = 652$ . Para la componente  $u$ , se observa que hay dos zonas muy bien definidas, la cercana a las paletas de los rotores con velocidad en la dirección positiva, y la región central con velocidades en sentido opuesto al anterior, puede notarse la velocidad mínima en el centro entre rotores. La figura central muestra la componente axial, notándose el efecto de succión de ambos rotores, en la parte izquierda y la zona de descarga en la parte derecha; nuevamente, con respecto a las velocidades mínimas éstas ocurren fundamentalmente en la región central entre rotores. En la figura de la derecha se muestra el campo del módulo de la velocidad total, en ella se pueden identificar diferentes zonas de interés: una región de baja velocidad a lo largo de la flecha incluyendo una región de velocidad mínima localizada en el parte central de la región de interés, en esta zona, el fluido es arrastrado por la flecha de manera que existe principalmente movimiento rotatorio del fluido con poco movimiento relativo en el plano; dos zonas de baja velocidad localizadas en los vórtices que generan las paletas del rotor donde nuevamente se tiene básicamente movimiento rotatorio; una zona de baja velocidad total localizada en la parte externa a la derecha y al centro de la zona de interés donde el fluido tiene velocidades muy bajas incluyendo la componente tangencial fuera del plano de la figura.

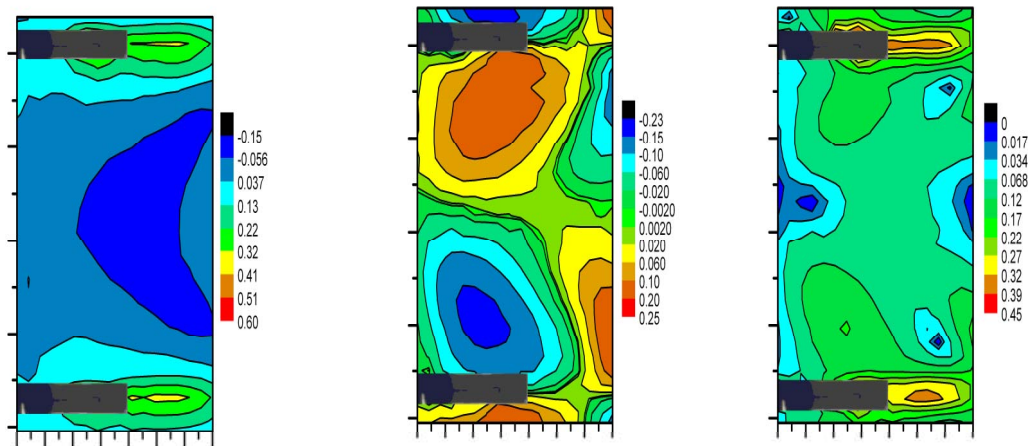


Figura 3.8. Campos de velocidad radial, axial y total para  $P^* = 1.5$  y  $Re = 652$

En las figuras 3.9, 3.10, y 3.11 se muestran grupos de figuras para diferentes valores de  $P^*$  y  $Re_D$ , en todas ellas se observa una disminución importante de las zonas de baja velocidad en



tanto se incrementa el  $Re_D$  y un aumento dramático de las zonas de baja velocidad cuando  $P^* = 2.0$ , de hecho para  $Re_D = 258$  es clara la ausencia de comunicación entre los rotores. Se puede observar también que las zonas de baja velocidad ubicadas en la región central de los vórtices generados por los rotores cambian tanto en forma como en tamaño con  $Re_D$ , para bajos  $Re_D$  su forma es más redondeada inclusive hasta achatada en la vertical y cuando aumenta  $Re_D$  la zona se vuelve más alargada e inclinada hacia el centro, además de su evidente mayor tamaño (ver  $Re_D = 1252.1$  y  $1002.5$ ), entonces la magnitud de las zonas de baja velocidad disminuyen con el  $Re_D$  entre los valores mínimos estudiados hasta llegar a un valor mínimo que andaría muy probablemente entre 500 y 600 y posteriormente vuelven a crecer, es decir hay dos efectos que compiten, el primero que domina a bajos  $Re_D$  que provoca un incremento monótono de los coeficientes de velocidad y en consecuencia de la cantidad de movimiento y el segundo donde los vórtices que generan las paletas crecen por lo que el flujo con giro producido domina. Aunque las figuras para  $Re_D > 1000$  muestran patrones de flujo bien definidos, como el resto, se debe aclarar que durante la realización de los experimentos con el equipo de análisis en línea y la visualización directa del mismo, la agitación y fluctuación de los campos de vectores a diferencia de los otros casos fue mucho mayor notándose en estos casos direcciones preferentes que dependen de la posición de los rotores que implicaban comunicación más directa entre ellos.

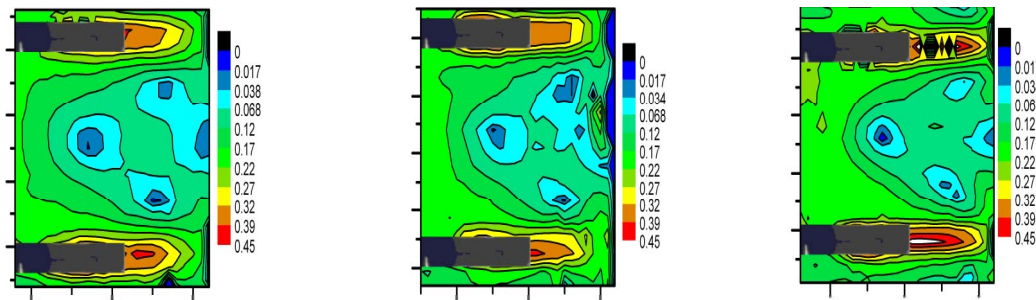


Figura 3.9. Campos de velocidad total para  $P^* = 1.0$  y  $Re = 389.5, 520, \text{ y } 652$

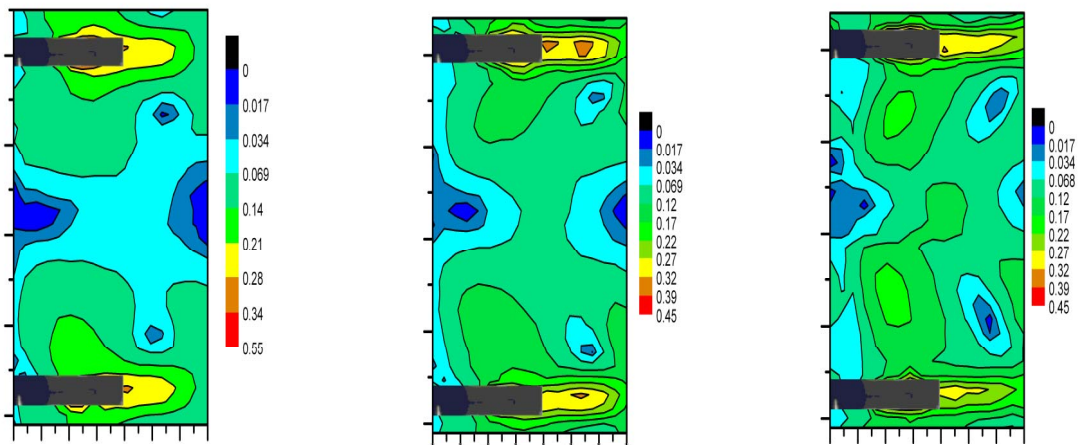


Figura 3.10. Campos de velocidad total para  $P^* = 1.5$  y  $Re = 258.5, 519.7 \text{ y } 1252.1$

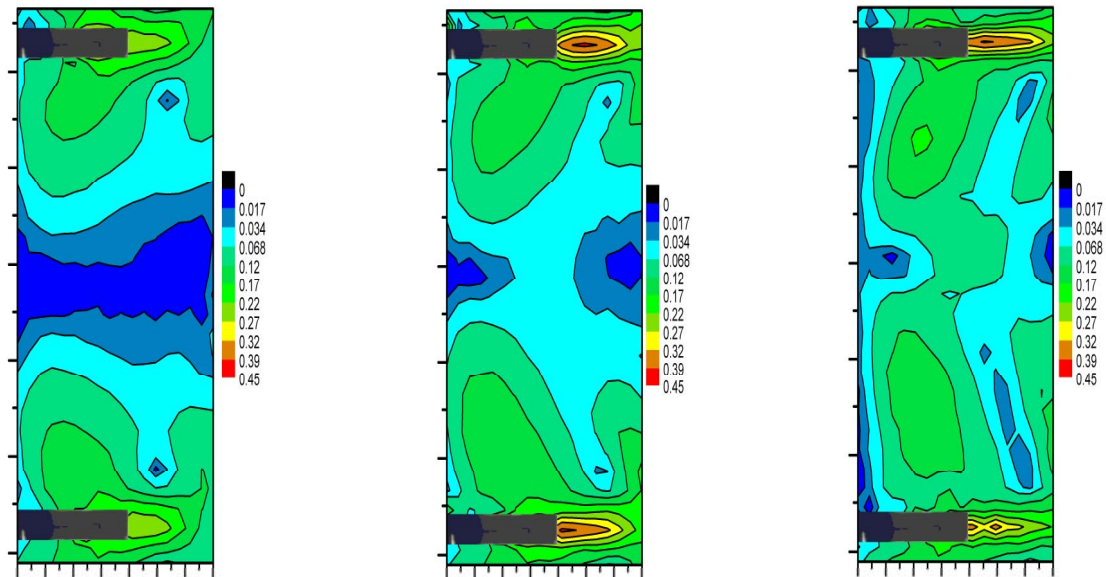


Fig. 3.11 Campos de velocidad para  $P^* = 2.0$  y  $Re = 259.4, 521.3$  y  $1002.5$

Retomando la información de la Tabla 3.5, en las últimas tres columnas se muestran valores del coeficiente de velocidad en el extremo de la paleta, y en las dos restantes, el porcentaje del total de puntos medidos con valores del coeficiente de velocidad equivalentes al 5% del valor en el extremo de la paleta y del 10% del mismo. Complementando la tabla, en la figura 3.12, se muestra la información sobre los porcentajes, respecto del total de puntos del campo, con coeficientes de velocidad pequeños (zonas con velocidades bajas) un rango más estrecho, ahora menores a 0.01 y 0.02 para toda la región de interés, y en las figuras 3.13 a 3.15, se ve el impacto que tienen en esos porcentajes las tres zonas de la cámara de mezclado: en la figura 3.13, se muestran los coeficientes de velocidad para la zona inferior, es decir, la comprendida entre la descarga a la cámara y el primer rotor, en la 3.14, el comportamiento en la zona media (central) entre los dos rotores, y en la 3.15, el comportamiento en la zona superior, entre el segundo rotor y la tapa de la cámara.

En todos los casos se observa cuantitativamente la disminución significativa de las regiones de baja velocidad con el  $Re_D$  y su posterior incremento pero mucho más lento para valores más elevados a los de  $Re_D \sim 550$ , que sería aproximadamente el valor con el que se logra minimizar estas zonas de baja velocidad. En cuanto a la otra variable independiente, es decir, el coeficiente de gasto  $C_q$ , el número de datos es insuficiente para generar una correlación clara aunque la tendencia si lo es, ya que es evidente el incremento del coeficiente de velocidad con el incremento de  $C_q$ .

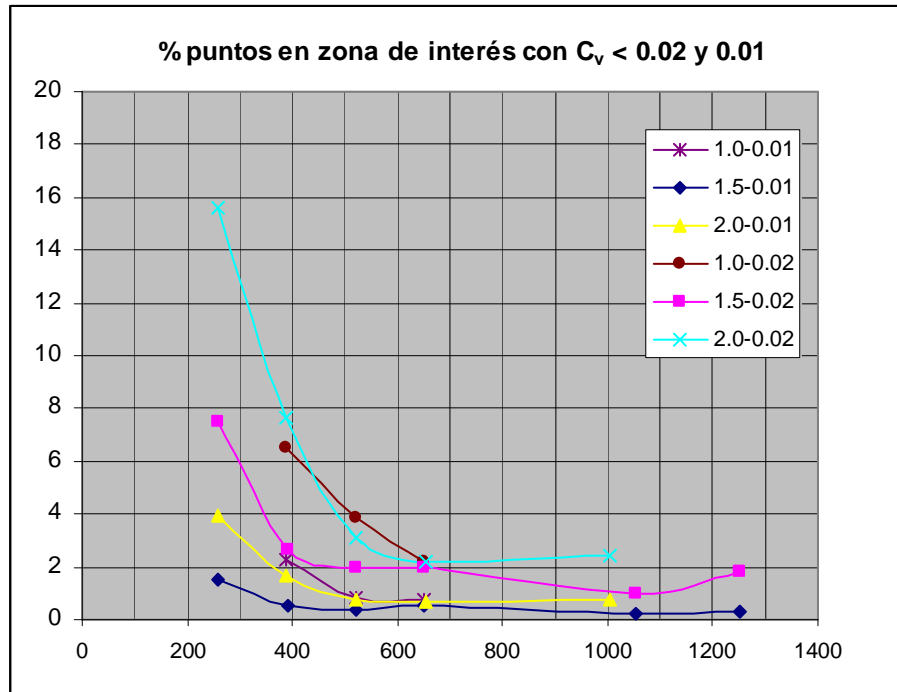


Figura 3.12. Porcentaje de puntos con  $C_v$  menores a 0.01 y 0.02. Zona de interés.

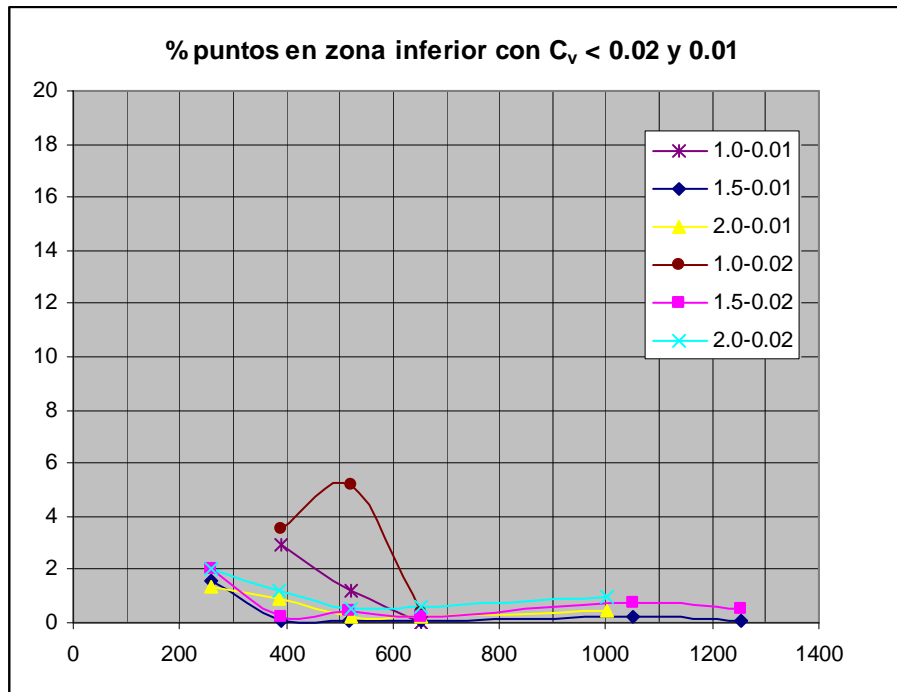


Figura 3.13. Porcentaje de puntos con  $C_v$  menores a 0.01 y 0.02. Zona inferior.

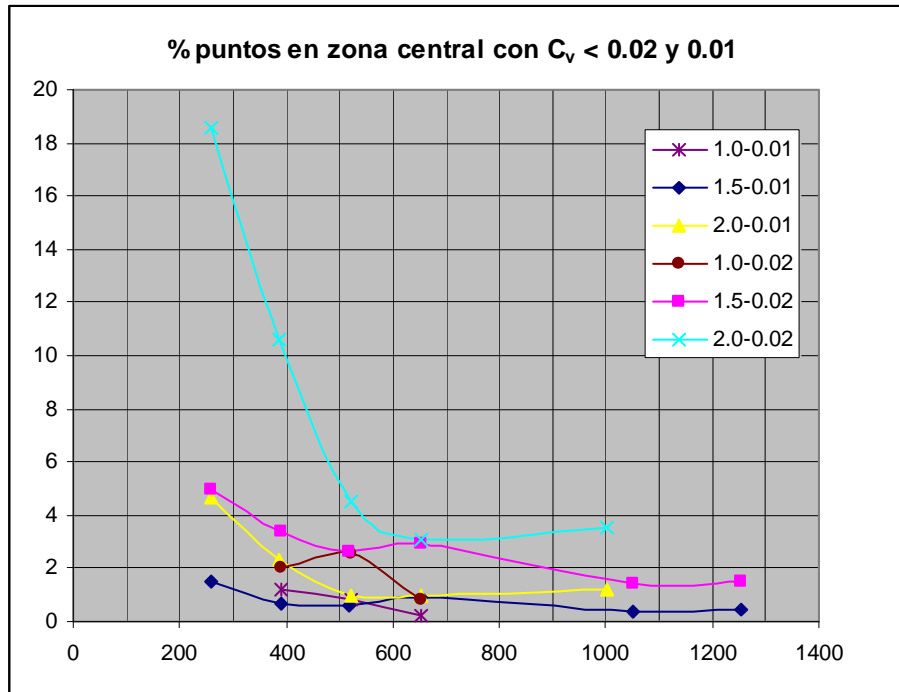


Figura 3.14. Porcentaje de puntos con  $C_v$  menores a 0.01 y 0.02. Zona central.

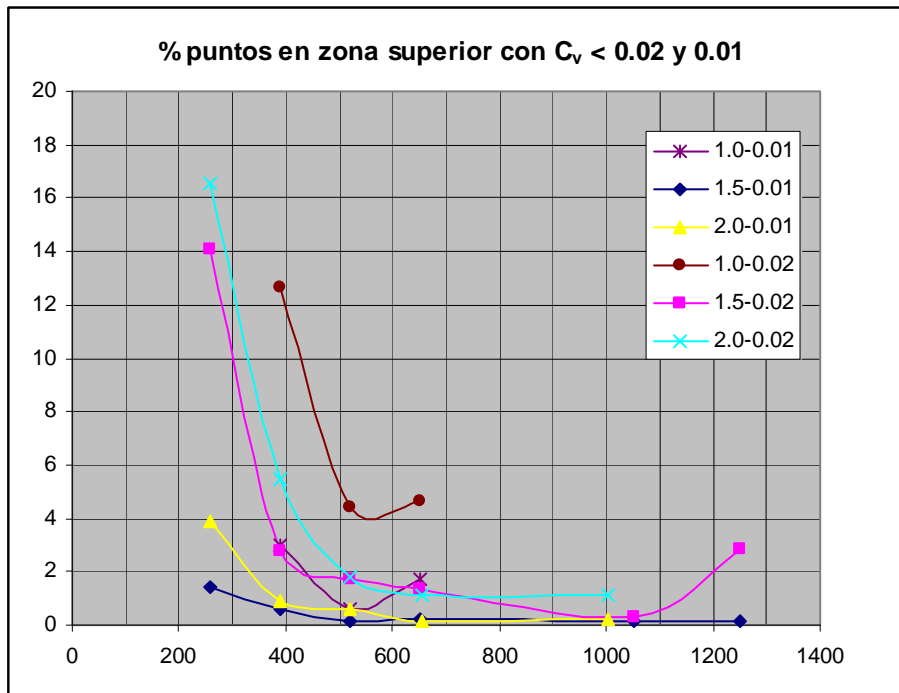


Figura 3.15. Porcentaje de puntos con  $C_v$  menores a 0.01 y 0.02. Zona superior.

### 3.5. Conclusiones.

El estudio del comportamiento de la interacción que existe entre rotores radiales de un mezclador de diámetro reducido, sin mamparas, está gobernado por la naturaleza vorticiosa del flujo para el caso de números de Reynolds bajos y se presentan las siguientes características:

- La influencia de  $Re_D$  y  $P^*$  es evidente al revisar los archivos de datos y los gráficos presentados, en tanto se incrementa el  $Re_D$  las zonas de rangos de coeficientes de velocidad se modifican, incrementándose los coeficientes de velocidad; en cuanto a  $P^*$  es claro el paso de una interacción muy fuerte entre los rotores cuando  $P^* = 1.0$  a una interacción prácticamente nula, cuando  $P^* = 2.0$ . Aunque los gráficos no dan información directa sobre el efecto de  $C_q$ , éste sin duda es sutil pero igualmente importante, lo que puede verse al analizar la información de la Tabla 3.5.
- Se generan 4 zonas con coeficientes reducidos de velocidad en el plano de medición: la primera ligada a la flecha que arrastra el fluido cercano y con una influencia mayor en la región central; un par de vórtices a los lados de cada paleta producto de la interacción del flujo radial de ésta con la frontera de la cavidad, éstos vórtices varían en tamaño y forma con el número de Reynolds; una zona asociada a la pared de la cámara y a la región central entre los rotores donde efectivamente los coeficientes de velocidad total más reducidos a diferencia de las otras tres regiones donde prevalece el movimiento rotatorio del fluido.
- La reducción de las zonas de coeficientes de velocidad bajo con el incremento de  $Re_D$  está comprometida por la acción de dos efectos: la cantidad de movimiento las reduce, pero al mismo tiempo, el incremento produce zonas vorticosas más amplias por lo que existe un valor mínimo que en el caso estudiado parece ocurrir para un  $Re_D \sim 550$ .
- Aunque no se presentan como resultados, es importante señalar que durante el desarrollo de los experimentos, el comportamiento del sistema para  $Re_D > 1000$  presenta un comportamiento fluctuante entre pares de tomas, asimismo para valores no determinados, se observó en las regiones toroidales a los lados de las paletas la formación de hélices de paso elevado en su interior.
- Tiempo de residencia: Los tiempos de residencia están definidos principalmente por las características físicas del mezclador por lo que si se combinan los resultados obtenidos en cuanto a disminución de zonas de baja velocidad, condiciones intermitentes que produzcan el paso repentino del flujo de un rotor a otro (cortos circuitos), y gasto del mezclador, puede considerarse aceptable la configuración de 2 rotores. En caso de que se defina posteriormente que hay que aumentar el tiempo de residencia, la solución será incrementar el número de rotores a 3.
- El uso de la información generada bien puede servir para el diseño de mezcladores con las características aquí identificadas pero al mismo tiempo quedan pendientes por obtener muchos más detalles que los que cubrió esta investigación.
- En el caso de este trabajo, la información obtenida sirvió de base para el dimensionamiento del sistema para producir la emulsión modelo a utilizarse en la fase de atomización. El sistema de producción de la emulsión modelo incluyó un arreglo de 3 rotores, con una paso  $P^* = 1.5$ , con el que se obtuvieron excelentes resultados. En el anexo se incluyen algunas fotos de los arreglos sistema utilizado para la obtención de los resultados.

## **Capítulo 4. Reología de emulsiones aceite-en-agua (OW).**

### **4.1. Introducción.**

El uso y manejo de emulsiones OW en diversas aplicaciones, tales como los sistemas de transporte, manejo y uso de las mismas, y particularmente, su comportamiento al hacerse pasar por una boquilla de atomización, con el fin de obtener elementos que sirvan para definir criterios generales de diseño de sistemas, o bien, para el diseño y optimación de los mismos, requiere de la información sobre sus características reológicas, esto es, su comportamiento esfuerzo contra rapidez de deformación, su viscosidad, los efectos que produce la temperatura, y de manera relevante, el efecto del cambio en su composición y de las características morfológicas de una emulsión, entre otros parámetros. Asimismo, en el contexto de esta tesis, además de conocer estas características, era necesario, identificar una emulsión de características controladas para utilizarse en el desarrollo de los experimentos objetivo del trabajo de investigación doctoral.

Para lograr los objetivos planteados y partiendo de cero, se definieron las siguientes actividades:

- Producción en laboratorio de emulsiones OW bajo diferentes condiciones, incluyendo los porcentajes de concentración de agua y aceite, el tipo de tensoactivo, buscando obtener en primer lugar, simplemente emulsiones.
- Producción de emulsiones con distribuciones de tamaños de gota (DTG) y composiciones distintas. A partir de esa actividad, una vez elegido el tensoactivo adecuado de acuerdo a las condiciones de producción, se utilizó el mismo compuesto para el resto de los lotes producidos ya que no fue de interés en este estudio el efecto de este componente en las emulsiones.
- Caracterización de emulsiones producidas: obtención de DTG y reología de emulsiones.
- Análisis de resultados y conclusiones.

Los componentes básicos utilizados en el desarrollo de esta actividad fueron un aceite comercial con especificación ISO VG68, agua destilada, y tensoactivos (AN130, AN 150).

### **4.2. Equipo utilizado.**

Producción en laboratorio: La producción de emulsiones se llevó a cabo utilizando equipo básico de laboratorio, esto es, recipientes de pirex, calentadores eléctricos, mezclador con control de velocidad y rotor tipo Rushton, cronómetro y termómetros de bulbo, principalmente.

Determinación de las distribuciones de tamaño de gota (DTG): para la determinación de DTG de las emulsiones fabricadas, se utilizó un difractor de muestreo Malvern Mastersizer 2000.

Reología: Para conocer la reología de las mismas, se utilizó un reómetro Haake RS150 con control de temperatura y de cortante, y sensor de cilindros concéntricos.

### 4.3. Resultados.

#### 4.3.1. Producción

En la fase de fabricación de emulsiones, se produjeron un total de 13 emulsiones OW que cumplieron distintos objetivos: la definición de las condiciones de fabricación más adecuadas en cuanto a tensoactivo, cantidad de agua agregada, velocidad de giro en el mezclador y estabilidad de las mismas. Se inició con un tensoactivo estable a una temperatura baja y en condiciones similares a las usadas en la producción de otras emulsiones, es decir, rangos de velocidad, tiempos de agregado. El resultado de esto permitió determinar que este tensoactivo no era el mejor para la emulsión que se deseaba lograr, una donde se tuviera un tamaño de gota máximo inferior al de las emulsiones de residuo de vacío OW, con el fin de poder utilizarla en experimentos. A continuación se dan más detalles sobre esta fase.

Algunas notas sobre la producción y caracterización de emulsiones

- Se generó formalmente una primera emulsión donde el criterio fue hacerla a condiciones ambiente, sin modificar la temperatura y sin el agregado de tensoactivos, se definieron las cantidades de 99% de aceite VG68 y 1% de agua (% w). La emulsión resultante (agua en aceite), fue llevada al microscopio para ver su morfología. Se puede mencionar como un experimento preliminar, para identificar algunos de los componentes utilizados en la producción protocolaria de emulsiones de aceite en agua.
- Se generó una segunda emulsión, con objetivos más definidos y siguiendo el protocolo ya conocido para la producción de emulsiones en laboratorio. En ésta se definió como objetivo ser una emulsión aceite en agua. Cumplido el objetivo de una emulsión, se verificó como tal en el microscopio, tomándose imágenes fotográficas de la morfología. Se determinó su distribución de tamaños de gota. Se identificó a esta emulsión como E01.
- Con base en los resultados obtenidos en cuanto a distribución de tamaño de gotas, su contraste contra los resultados obtenidos en el experimento de atomización de referencia (fase 1, capítulo 2), y tomando en cuenta que se desean obtener gotas de spray que contengan a las gotas de la fase dispersa de la emulsión, entonces, se definió que el espectro necesario de tamaños de gotas tuviera un valor de  $D_{0.5} \sim 10$  m. Adicionalmente, se concluyó que era necesario producir en primer lugar las condiciones de los tamaños deseados en la emulsión, y a partir de ahí, modificarla, mediante su dilución en agua., hasta llevar la viscosidad a los valores deseados.
- A partir de la segunda emulsión se utilizó un tensoactivo con una temperatura de turbidez mayor (70°C). La tabla 4.1, muestra un resumen de las condiciones utilizadas en la generación de las emulsiones.

Tabla 4.1. Condiciones de producción de las emulsiones OW

condiciones de producción de emulsiones								
ID	temp [°C]	mezclador [rpm]	agua [g]	aceite [g]	TA [g]	agua [%]	aceite [%]	TA [%]
E01	40	700	150.09	450.46	5.00	24.79	74.39	0.83
E02	60	700	150.02	450.20	5.03	24.79	74.38	0.83
E03	65	700	120.05	479.99	6.00	19.81	79.20	0.99
E04	65	700	120.00	480.02	6.00	19.80	79.21	0.99
E05	65	700	100.01	499.99	6.00	16.50	82.51	0.99
E06	65	350	100.00	500.00	6.00	16.50	82.51	0.99
E07	65	700	100.36	700.00	8.00	12.42	86.60	0.99
E08	65	700	86.04	600.00	6.86	12.42	86.59	0.99
E09	65	700	100.04	500.02	6.00	16.51	82.50	0.99
E10	65	1000	100.04	500.02	6.00	16.51	82.50	0.99
E11	65	700/1000	100.01	500.00	6.00	16.50	82.51	0.99
E12	65	700/1100	100.13	500.09	6.00	16.52	82.49	0.99
E13	65	700/1100	100.02	500.05	6.00	16.50	82.51	0.99

- Las diferencias encontradas en las emulsiones 1 a 7 son fácilmente reconocidas ya que se deben a la variación de alguno de los parámetros.
- Al cambiar de tensoactivo para incrementar la temperatura y por lo tanto reducir la viscosidad del aceite, se produjo un cambio sustancial en la distribución de tamaños de gotas y esto se confirmó con las siguientes emulsiones en las que para reducir aun más el tamaño, se incremento levemente la temperatura y en particular, se fue cambiando la cantidad de agua, disminuyéndola progresivamente, los resultados fueron congruentes hasta la emulsión E05. En este intervalo se pudo notar que las emulsiones mejoran en comportamiento en tanto se agrega el aceite de manera más lenta (mejor distribución y sobre todo mejor estabilidad).
- Con el fin de buscar la manera de evitar los tamaños pequeños de gotas que aparecen en los gráficos de distribución de tamaños como otra cresta pequeña, se decidió hacer una emulsión (E06) con las mismas características de la E05, pero disminuyendo la velocidad del mezclador a 350rpm (50% del valor usado), los resultados muestran que debe haber otro mecanismo de ruptura porque la cresta prevalece, y la distribución se hace mucho más amplia, obteniéndose en este caso valores máximos de tamaño de gota de más de un orden de magnitud superiores.
- Retomando entonces el protocolo ya efectuado, se procedió a generar la E07 disminuyendo aún más la cantidad de agua. En este caso, no se pudo controlar totalmente la cantidad agregada de aceite por las cantidades utilizadas, de todas maneras, se logró la emulsión con menores tamaños de gota, quedando presente la cresta de gotas pequeñas.
- Sin poder conocerse aún las causas de la cresta de gotas pequeñas, se había planteado un mecanismo distinto de ruptura de gotas, probablemente por la presencia de alguna sustancia en el aceite que tuviese características distintas, y con el hecho de que el aceite utilizado se había consumido se procedió a seguir con aceite de las mismas características, pero proveniente de un bote nuevo, se aclara que el aceite utilizado era un aceite usado en otro experimento el cual no había sido sometido a temperaturas más allá de las del medio ambiente, por lo que se esperaba que sus características fueran muy similares a las del aceite nuevo.
- Se procedió a generar la E08 con las mismas cantidades a las usadas en la anterior y solamente con la diferencia de que el aceite en este caso era aceite nuevo. El



resultado inesperado es que la distribución de tamaños de gota fue radicalmente distinta a las generadas, particularmente a la E07, obteniéndose valores máximos de tamaños de gotas de más de 100 micras y también un mayor margen hacia tamaños pequeños (ver figura). La E08 no es claramente representativa con las anteriores ya que es nominalmente igual a la E07 pero en este caso se ajustaron las cantidades usadas para poder agregar todo el aceite usando un tiempo más corto para el aporte de aceite.

- Descartando la E08 por tener una curva de distribución muy anómala causada probablemente por el poco tiempo usado en el agregado de aceite, se procedió a generar la E09 en la que se buscó repetir alguna de las ya fabricadas, en este caso se usó como referencia la E05. Nuevamente los resultados obtenidos son muy distintos a los de la E05, con un patrón de distribución de tamaños de gotas corrido a gotas más grandes. Sin poder concluir las causas de estas grandes diferencias, se decidió determinar las viscosidades de los aceites empleados, sin que estos resultados sean concluyentes porque a pesar de que el aceite nuevo tiene mayor viscosidad que el usado -que explicaría el mayor tamaño de gotas- su valor es marginal sobre el usado, apenas un poco más de 5%; se busco información acerca de si el aceite usado había estado en contacto con alguna otra sustancia, pero se encontró que solamente se utilizó en el modelo del mezclador dinámico y posteriormente se regresó al envase desde donde se recopiló para fabricar las emulsiones, lo que tampoco da pistas sobre el comportamiento distinto.
- La emulsión E10 se produjo a partir de la emulsión E09 calentándola y usando el mezclador a 1000 rpm, la emulsión resultante presentó muy buenas características en cuanto a distribución de tamaño de gotas y estabilidad.
- La emulsión E11 fue el primer intento de conseguir la reproducción de la emulsión E10 por lo que se produjo con las mismas cantidades de la emulsión E09 pero utilizando una velocidad mayor de mezclado (1000 rpm) después del agregado de aceite, aunque la emulsión resultante presentó buenas características, el tamaño de gotas fue mayor al obtenido con la emulsión E10 lo que se interpretó como una falta de cizallamiento por lo que se decidió tratar de corregir en la siguiente emulsión con mayor velocidad en el mezclador.
- Para mejorar el tamaño de gotas de la emulsión E11, se definió para la E12 hacer el mezclado adicional llevando la velocidad de mezclado a 1100 rpm, con este valor, se logró reproducir la E10; finalmente, la E13 se programó para repetir la E12, lográndose el objetivo.

La figura 4.1 muestra el conjunto de distribuciones de tamaños de gotas de todas las emulsiones producidas, la figura 4.2, los resultados obtenidos con las emulsiones E10, E12 y E13.

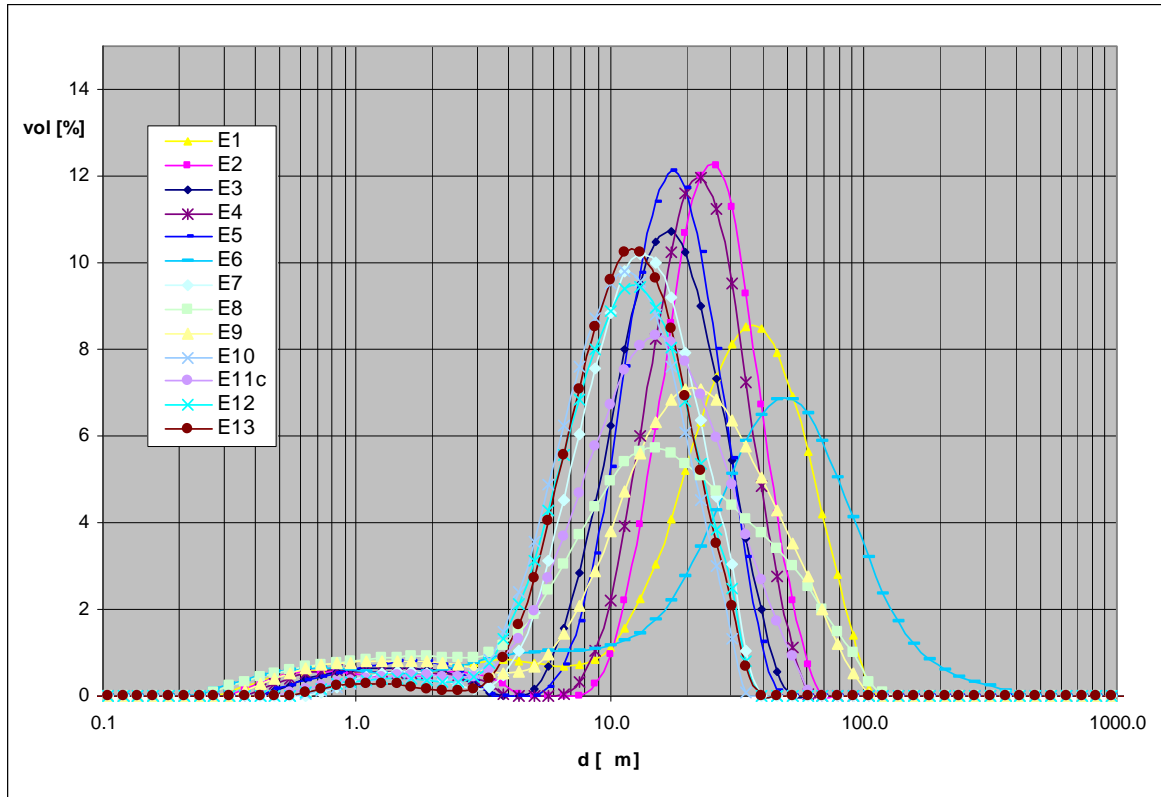


Figura 4.1. Distribuciones de tamaños de gotas de las emulsiones E01 a E13

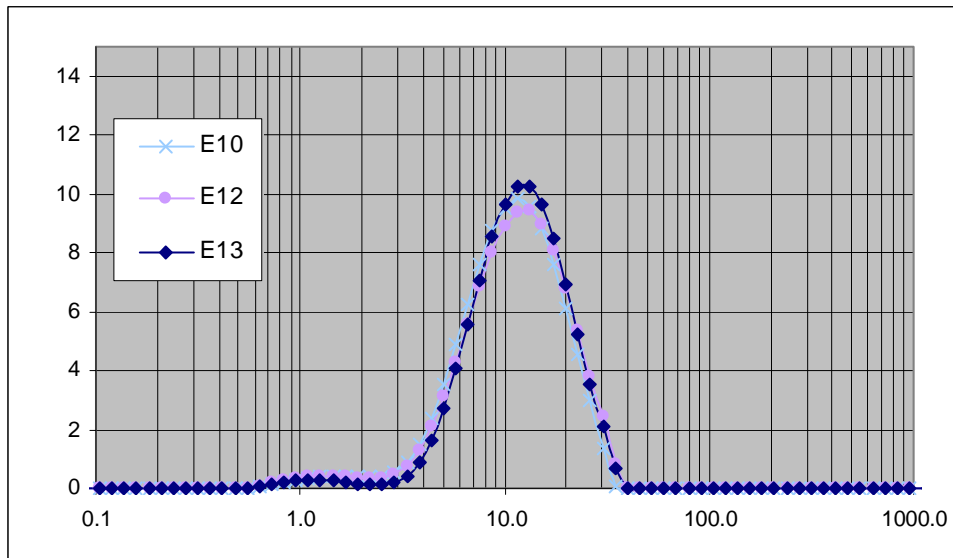


Figura 4.2. Distribución de tamaños de gotas de las emulsiones E10, E12 y E13.

#### 4.3.2. Estabilidad de las emulsiones.

La determinación cuantitativa de las características de las emulsiones se realizó con ayuda del difractómetro Malvern con el que se encontraron las distribuciones del tamaño de gota justo después de su fabricación y también utilizado con la intención de verificar las condiciones con el paso del tiempo de alguna emulsión seleccionada,

o en algunos casos, para verificar sus condiciones después de usar la emulsión en el reómetro, aunque cualitativamente, también se tomó en cuenta la apariencia de la misma al ser muy evidente la separación o rompimiento de parte de las emulsiones por lo que se reporta aquí la inspección visual de las mismas. Se incluye en la lista la fecha de producción, la fecha de una verificación intermedia y la fecha de una segunda inspección junto con un comentario de las inspecciones realizadas. Las notas corresponden con la fecha del informe generado para el LSC del IMP (agosto del 2008).

E01 (16/04/08, 10/06/08, 04/07/08) se separó en muy poco tiempo, su deterioro es muy elevado. Inservible.

E02 (17/04/08, 10/06/08, 04/07/08) con algo de separación de aceite aunque parece que puede utilizarse en la comparación, se utilizó en la fase de reología. Ha avanzado el deterioro.

E03 (18/04/08, 10/06/08, 04/07/08) se mantiene en buenas condiciones, buena apariencia, se utilizó en la fase de reología.

E04 (21/04/08, 10/06/08, 04/07/08) se mantiene en buenas condiciones, con algo de separación, se utilizó en la fase de reología.

E05 (23/04/08, 10/06/08, 04/07/08) se mantiene en buenas condiciones, se utilizó en la fase de reología.

E06 (24/04/08, 10/06/08, 04/07/08) se separó muy rápido, en menos de 24 horas ya había ruptura evidente. Inservible

E07 (29/04/08, 10/06/08, 04/07/08) se mantiene en buenas condiciones, con algo de separación de aceite, entre la E02 y la E04, se utilizó en la fase de reología.

E08 (30/04/08, 10/06/08, 04/07/08) el tamaño de gota cambió significativamente al cambiar el aceite por aceite nuevo, se nota cierta separación, se ha deteriorado estando entre la E01 y la E06.

E09 (07/05/08, 10/06/08, 04/07/08) en buen estado inicial, con separación de aceite, menor a E08.

E10 (09/05/08, 10/06/08, 04/07/08) en buenas condiciones después de casi 2 meses de su fabricación. La emulsión de referencia para las E12 y E13.

E11 (16/05/08, 10/06/08, 04/07/08) con algo de aceite separado, menor que en E08.

E12 (20/05/08, 10/06/08, 04/07/08) parece en buen estado, sin embargo en la última inspección muestra un poco más de aceite separado

E13 (22/05/08, 10/06/08, 04/07/08) en buen estado, la que sirvió de referencia para la fase de reología, ha mantenido sus condiciones, salvo las cuantificadas después del último experimento variando la temperatura en el reómetro, donde mostró un cambio significativo en su distribución de tamaños de gota.

En resumen, a pesar de la separación de parte del aceite causado entre otras cosas por la evaporación de agua, y la inestabilidad de las mismas, lo que queda de las emulsiones aunque en algunos casos haya cambiado significativamente, no ha modificado la posición de la cresta de máxima concentración, esto es, las emulsiones cuantificadas han conservado el valor del diámetro correspondiente a la máxima concentración en volumen, disminuyendo ese valor e incrementando las concentraciones de las gotas a la derecha e izquierda de éste, aunque también

elevando los valores de las gotas pequeñas de la segunda cresta observada. No existe una explicación clara para que esto se de ya que implica la ruptura de gotas grandes en gotas pequeñas dentro del recipiente que contiene la emulsión.

Como conclusión principal de este análisis, se definió a E13 como la emulsión base a fabricar para la siguiente fase, es claro que se cuenta con un período aceptable de estabilidad de la emulsión (más de un mes\*) para poder trabajar con ella en la fase de atomización.

\* Nota: el contenido principal de las notas para el informe al IMP mencionado, fue escrito justo después de la fabricación de las muestras en laboratorio por lo que se manejaba como deseable contar con al menos ese período de estabilidad para poder trabajar con confianza en la fase de atomización; cuando ésta finalmente se dio, las emulsiones resultaron ser mucho más estables que ese pequeño período. De hecho, en la última inspección antes de escribir este capítulo de la tesis (2010), las emulsiones, después de quitarles los residuos y ser guardadas, mostraban ser emulsiones; aún cuando ya no se les efectuó un análisis para determinar su DTG y ver las diferencias, con las de origen.

#### **4.3.3. Reología de las emulsiones.**

La determinación cuantitativa de las características de las emulsiones se realizó con ayuda del reómetro Haake RS150 con control de temperatura y velocidad de corte, empleando un sensor de cilindros concéntricos. En todos los casos en los que se midió la viscosidad a temperatura constante, se definió una rutina de medición para 5 diferentes valores de rapidez de deformación (velocidad de corte): 30, 60, 100, 200 y 400 s<sup>-1</sup>.

#### **4.3.4. Contenido de agua.**

Inicialmente, para conocer la influencia del contenido de agua en la emulsión sobre la viscosidad, se utilizó como base la emulsión denominada como E13, diluyéndola a las condiciones enlistadas en la tabla 4.2. Previo a la dilución de la muestra, se verificó el contenido de agua de E13 por evaporación con una discrepancia menor al 1% en las muestras utilizadas, la composición base es la enlistada en el primer lugar de la tabla 4.2; a partir de ahí, se calcularon las proporciones restantes de acuerdo con el cantidad adicional de agua agregada.

#### **4.3.5. Reología.**

En las figuras 4.3 y 4.4, se muestran los resultados obtenidos con las emulsiones de la tabla 1 para la viscosidad y el esfuerzo cortante como funciones de la velocidad de corte, respectivamente. Es claro que para valores comprendidos entre el contenido original de agua (13.4% en peso) y un valor cercano al 30%, el comportamiento de la emulsión es típicamente pseudoplástico, y después de alcanzar ese valor, la emulsión se comporta como un fluido mas bien newtoniano, siendo más claro ese comportamiento en la figura 4.4, donde las curvas de esfuerzo contra rapidez de deformación son líneas rectas para los casos con emulsiones con contenido de agua mayores al 30%. En las figuras se incluyeron como elementos de comparación, la viscosidad del aceite empleado para generar la emulsión (ISO VG68) y otro aceite de viscosidad baja utilizado comúnmente

como medio de enfriamiento, y en el laboratorio, en un banco hidráulico de pruebas (ABH).

Tabla 4.2. Composición de las muestras utilizadas

Emulsión	H <sub>2</sub> O [%w]	O+TA [%w]
E13+0	13.410	86.590
E13+1	17.028	82.972
E13+2	22.134	77.866
E13+3.5	28.952	71.048
E13+3	29.421	70.579
E13+4	36.650	63.350
E13+5	42.427	57.573
E13+5.6	44.913	55.087
E13+5.4	44.913	55.087
E13+5.5	44.929	55.071
E13+6	46.292	53.708
E13+7.5	56.791	43.209

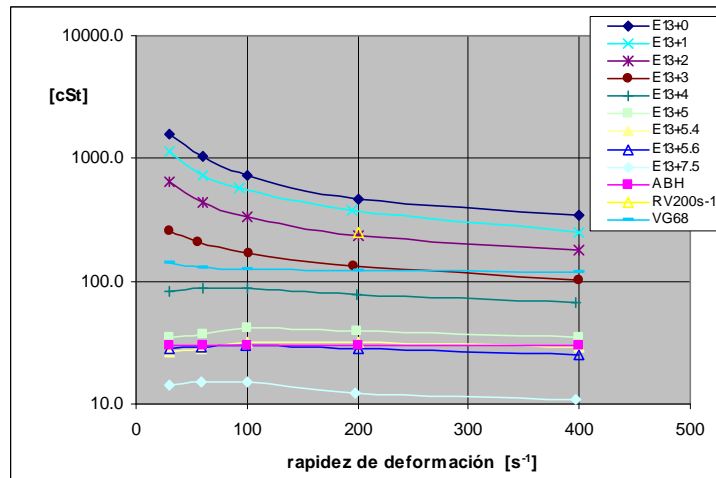


Figura 4.3. Efecto sobre la viscosidad del contenido de agua en una emulsión

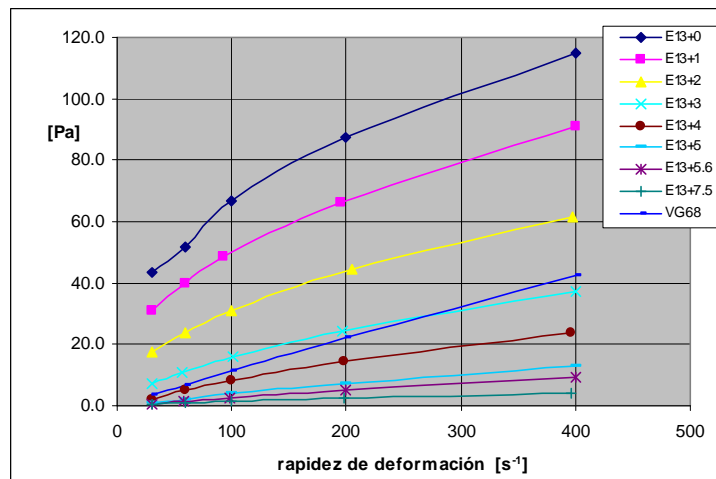


Figura 4.4. Efecto sobre el esfuerzo cortante del contenido de agua en una emulsión

En la figura 4.5, se muestra el efecto producido por el contenido de agua en la emulsión E13 para el caso de la velocidad de corte  $\dot{\gamma}$ , de 200; existe una caída exponencial de la viscosidad con el contenido de agua, y con los valores obtenidos la viscosidad varía de la forma.

$$= 1591.2e^{-0.0961W} \quad (1)$$

Utilizando la información de la figura 4.4, puede notarse que el cambio de fluido pseudoplástico a newtoniano ocurre para contenidos de agua entre 29.42 % (E13+3) y 36.65 % (E13+4), que corresponde a un valor cercano al cruce de las curvas de comportamiento de la emulsión con el contenido de agua, con la del valor de la viscosidad del aceite empleado en la emulsión (ISOVG68) en la figura 4.5, esto es,  $W \sim 30\%$ .

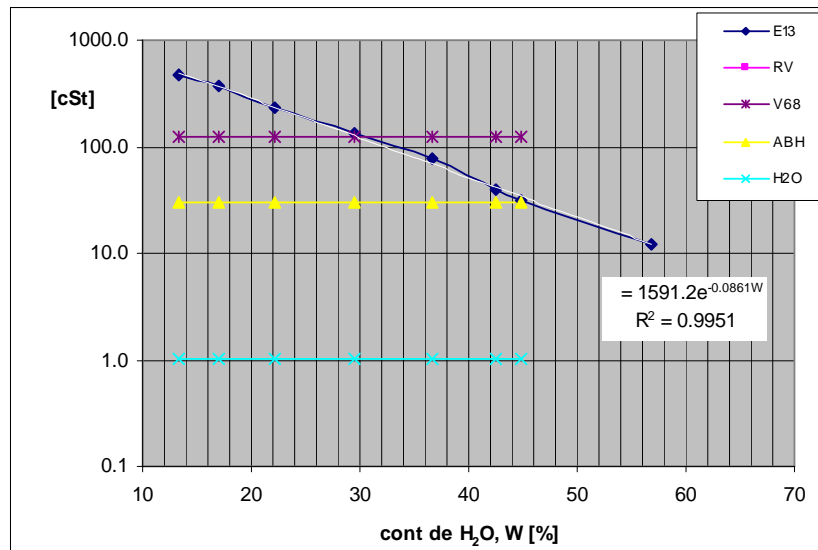


Figura 4.5. Efecto del contenido de agua en la emulsión.

Aunque no se llevó más allá el análisis del cambio en las características de la emulsión, es evidente que en tanto se diluye la emulsión en agua, las características newtonianas de los fluidos empleados se hacen notar con el incremento del contenido de agua; el cambio de pseudoplástico a newtoniano ocurre cuando la viscosidad aparente de la emulsión – i.e., la viscosidad producida tanto por el fluido diluyente como por la interacción de las gotas de la fase dispersa- se acerca a la del fluido más viscoso, en este caso el aceite ISOVG68.

#### 4.3.6. Distribución de tamaños de gotas.

Para conocer el efecto de la distribución del tamaño de gotas en las emulsiones se procedió de la forma siguiente: utilizando como base una de las emulsiones con comportamiento pseudoplástico de la tabla 4.2, en este caso la E13+3 con un contenido

de agua del 29.42% en peso, se eligieron 5 emulsiones adicionales, cada una con diferente distribución de tamaños de gota, modificándolas a partir del cálculo de la cantidad de agua necesaria, con el fin de obtener emulsiones con la misma composición, i.e., mismo contenido de agua, aceite y tensoactivo, pero diferente distribución de tamaños de gotas; se midió la viscosidad de las mismas manteniendo la temperatura constante. En este caso nuevamente se definió una rutina de medición para 5 diferentes valores de rapidez de deformación (velocidad de corte): 30, 60, 100, 200 y 400  $s^{-1}$ . La figura 4.6, muestra los perfiles de distribución de tamaños de gotas de las emulsiones, esta figura se complementa con la tabla 4.3, que compila los valores característicos  $D_{0.1}$ ,  $D_{0.5}$ ,  $D_{0.9}$ ,  $D_{32}$  y "span" de las mismas. La misma tabla contiene dos valores adicionales que se discuten más adelante.

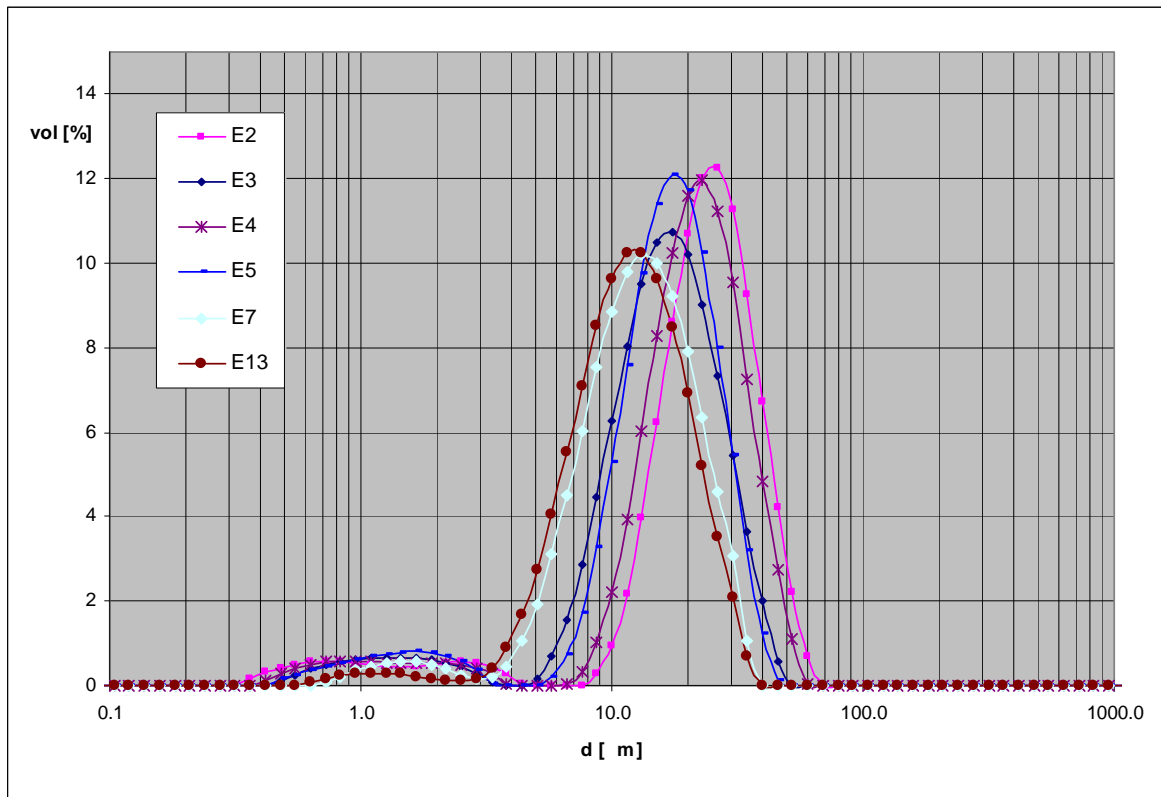


Figura 4.6 Distribuciones de tamaños de gotas de las emulsiones seleccionadas.

Tabla 4.3. Características de las emulsiones seleccionadas

Emulsión	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$	span	$D_{32}$	$D_{p \times vol}$	$D_{p \times vol}/D_{32}$
E13+3	4.992	12.351	27.127	1.792	8.296	13.093	1.578
E07+2.8	4.084	12.820	40.687	2.855	6.620	14.733	2.226
E05+2.4	7.188	16.427	30.746	1.434	7.642	16.935	2.216
E03+2.1	4.273	16.350	36.633	1.979	6.960	17.171	2.467
E04+1.8	3.001	19.066	35.604	1.710	6.725	19.113	2.842
E02+1.8	1.867	19.773	38.589	1.857	4.172	19.864	4.761

Las figuras 4.7 y 4.8, muestran el comportamiento de la viscosidad y el esfuerzo cortante, respectivamente, como función de la rapidez de deformación de las

emulsiones utilizadas; se aprecia que algunas curvas no se cruzan para ninguna velocidad de corte lo que lleva a conclusiones directas (E13, E03, E02), esto es, la viscosidad aumenta cuando las curvas de distribución de tamaños de gotas se mueven hacia la izquierda (fig. 4.6), mostrando el efecto de la mayor interacción del conjunto de gotas más pequeñas, sin embargo, hay casos donde no ocurre así, cruzándose para valores más bajos de velocidad de corte, e incrementando la pendiente después de ese cruce (E05) o disminuyendo la pendiente (E07), lo que complica su comportamiento.

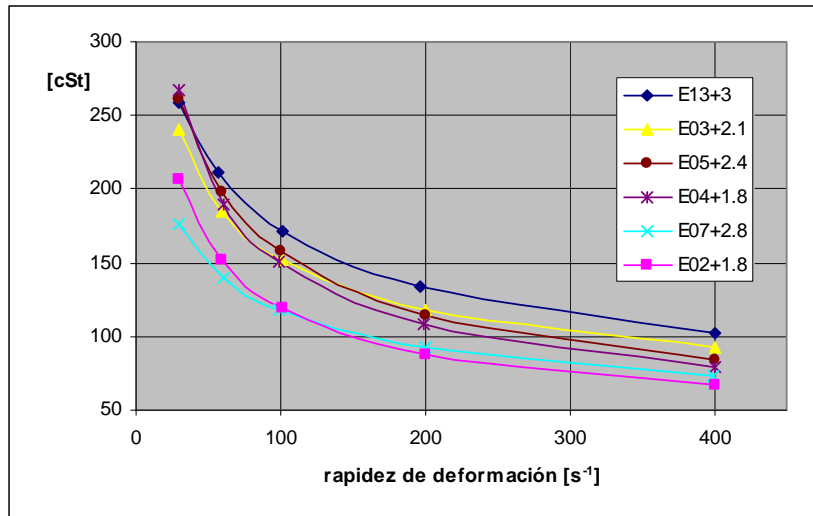


Figura 4.7. Viscosidad de algunas emulsiones de igual composición

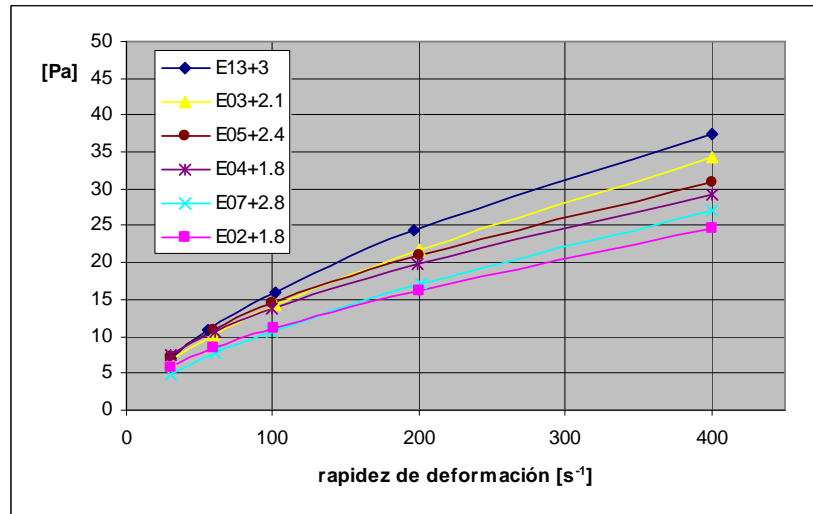


Figura 4.8. Esfuerzo cortante de algunas emulsiones de igual composición

Es claro que el incremento en el tamaño de gotas basado en  $D_{0.5}$ , produce emulsiones con viscosidades más pequeñas pero los cruces implican que en algunos rangos existe un efecto más pronunciado de las gotas más pequeñas o de las más grandes; si se toma como referencia a  $D_{32}$ , la conclusión sería en el sentido inverso.

Con el fin de obtener una relación del efecto sobre la viscosidad, de la distribución del tamaño de gotas en las emulsiones, se planteó la obtención de los grupos



adimensionales involucrados a partir de las variables que intervienen: los diferentes tamaños característicos  $D_{0.1}$ ,  $D_{0.5}$ ,  $D_{0.9}$ ,  $D_{32}$ , y la velocidad de corte, esto es

$$= f(\omega^{-1}, D_{0.1}, D_{0.5}, D_{0.9}, D_{32}) \quad (2)$$

y como se utiliza normalmente como parámetro el “span”, que incluye a los tres primeros diámetros de (2), entonces otra forma de la ecuación anterior es,

$$= f(\omega^{-1}, D_{0.9-0.1}, D_{0.5}, D_{32}) \quad (3)$$

Ahora, con la ayuda del teorema de Buckingham se tiene que en (3), existen 3 parámetros adimensionales independientes. Al analizar los datos obtenidos, se definió a partir de lo anterior, un grupo que involucrara a todos los diámetros de (3), el diámetro ponderado  $D_p$ , de la forma

$$D_p = aD_{0.1} + bD_{0.5} + cD_{0.9} \quad (4)$$

donde los coeficientes a, b y c son % de ponderación de los diámetros involucrados. Con base en lo anterior, se generaron los siguientes grupos adimensionales:

$$\frac{\omega^{-1}}{D_{0.5}^2} = \left( \frac{\omega^{-1}}{D_{32}} \right) \left( \frac{D_p}{D_{32}} \right) \quad (5)$$

Finalmente, del análisis de datos se propuso

$$\frac{\omega^{-1}}{D_{0.5}^2} \left( \frac{\omega^{-1}}{D_{32}} \right)^n = \left( \frac{D_p}{D_{32}} \right) \quad (6)$$

Utilizando como base la expresión de (6), se encontró que los resultados se agruparon adecuadamente cuando  $n= 1.4$ , con  $a=c=0.1$  y  $b=0.8$ . En la figura 4.9, se muestra la información de la figura 4.7 cuando se agrupa utilizando los parámetros obtenidos; en la figura 4.10, se muestra la correlación de los datos experimentales con los parámetros propuestos.

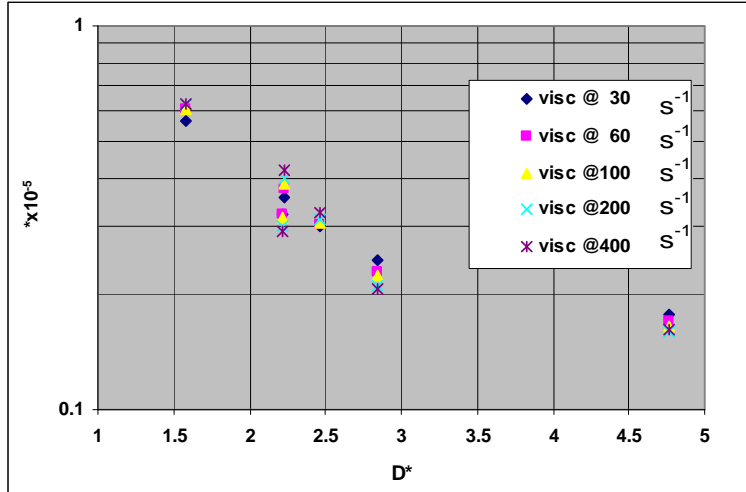


Figura 4.9. Viscosidad adimensional como función del diámetro adimensional

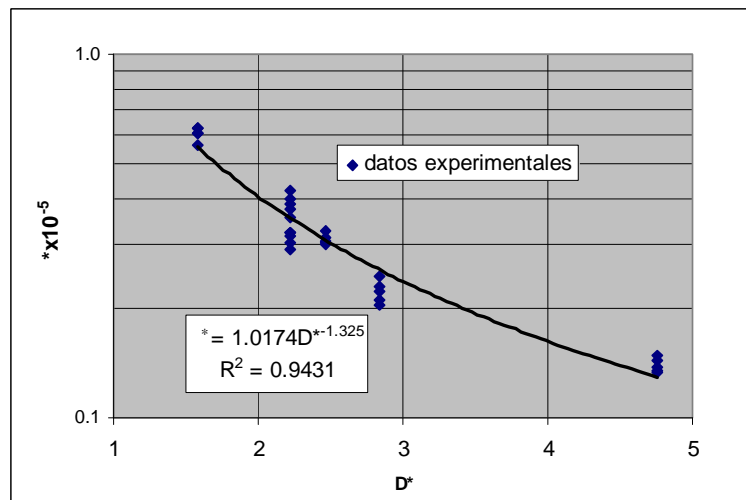


Figura 4.10. Viscosidad adimensional como función del diámetro adimensional

La expresión encontrada para los parámetros propuestos es

$$\mu^* = 1.0174 D^{*-1.325} \times 10^5 \quad (7)$$

Donde

$$\mu^* = \frac{-1}{-1 D_{0.5}^2} \left( \frac{-1}{0} \right)^{1.4}, \quad D^* = \left( \frac{D_p}{D_{32}} \right),$$

y

$$D_p = 0.1D_{0.1} + 0.8D_{0.5} + 0.1D_{0.9}$$

con un coeficiente de correlación por encima del 94%.

#### 4.3.7. Efecto de la temperatura.

Una vez obtenidos los resultados del comportamiento en función de la cantidad de agua y de la distribución de tamaños de gotas, para el caso de temperatura constante, se decidió complementar el análisis incluyendo el efecto que tiene la temperatura, para lo cual, se utilizaron las emulsiones de la tabla 4.2, efectuándose mediciones de viscosidad para un rango de temperaturas entre 30°C y 65°C, usando ese límite ya que fue la temperatura a la que se fabricaron la mayoría de las emulsiones bajo estudio. En términos generales se pueden hacer las siguientes observaciones: Cuando la emulsión está por encima del rango que la define como una emulsión de alta fase interna, es decir una densidad de la fase dispersa  $\geq 74\%$  (el caso de la E13 sin diluir), la viscosidad como función de la temperatura se comporta exponencialmente aunque con pendientes más pequeñas que el aceite del que se origina, sin embargo, cuando la emulsión está en la zona de comportamiento newtoniano -como es el caso de la E13+5 y E13+5.5-, existe un comportamiento muy distinto ya que la viscosidad decae parabólicamente. Cuando se hizo la primera medición de la viscosidad como función de la temperatura y en virtud de que se había identificado al fluido como newtoniano se cambió la configuración para la operación del reómetro, fijándose un valor constante de velocidad de corte  $\dot{\gamma} = 200 \text{ s}^{-1}$  pero al revisar los resultados, se encontró que los valores medidos en este caso fueron más reducidos a los que ya se conocían de esta emulsión, es decir a  $T=30^\circ\text{C}$ , por lo que la emulsión presenta un comportamiento dependiente de la velocidad de corte. Para evitar este problema se replanteó el esquema de medición, iniciando nuevamente con las velocidades de corte bajas y una vez que se alcanzó la velocidad deseada se efectuó el cambio en la temperatura; los resultados confirmaron los previos por lo que se consideró que éstos eran correctos. La figura 4.11, muestra el comportamiento en función de la temperatura.

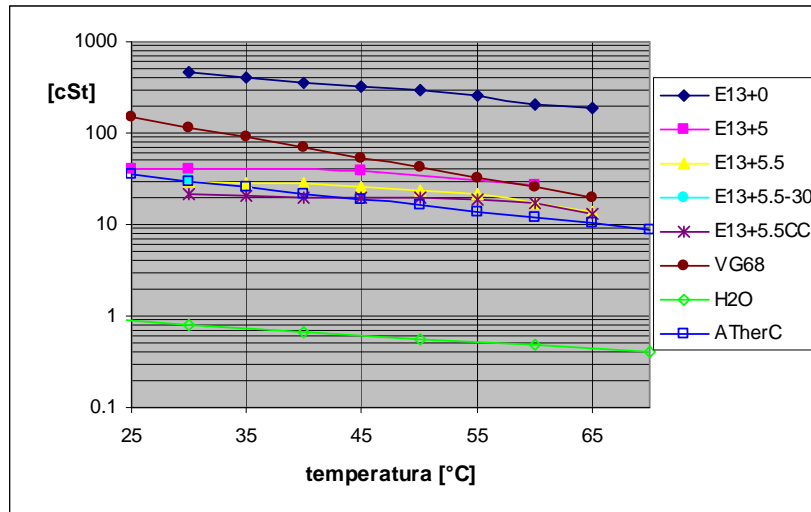


Figura 4.11. Viscosidad como función de la temperatura.  $\dot{\gamma} = 200 \text{ s}^{-1}$

Los ajustes polinomiales para las emulsiones E13+5 y E13+5.5 son los siguientes; en ambos casos los coeficientes de correlación son mucho mayores al 90%.

$$= -0.0197T^2 + 1.2883T + 20.231, \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9882$$

$$= -0.0108T^2 + 0.56T + 22.776, \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9989$$

Una vez establecidos el procedimiento de fabricación de emulsiones, las características generales de las emulsiones y cómo ajustarlas a condiciones específicas, se pueden definir las características de la emulsión deseada para la siguiente fase (emulsión modelo). Utilizando la información de capítulo anterior, en cuanto a la configuración óptima del equipo para la producción ya sea continua o a una escala superior, se puede concluir que existe información suficiente para la producción de la cantidad necesaria de emulsión modelo para su uso en la fase de atomización. Los detalles de la emulsión modelo se describen en el siguiente capítulo.

#### 4.4. Conclusiones.

Con el fin de conocer el comportamiento de emulsiones OW para seleccionar una que resulte apropiada para su uso en experimentos de atomización, se generaron y analizaron diversas emulsiones teniendo en cuenta el criterio siguiente: la emulsión a elegir debería tener una viscosidad aparente igual a la de un aceite previamente utilizado en una boquilla de atomización cuyos resultados servirán para comparar tanto cualitativamente como cuantitativamente el comportamiento del spray de emulsión; entonces, se requería identificar su composición y su comportamiento como función de la temperatura. La emulsión que reproduce las condiciones con una viscosidad de 41 cSt a  $T = 28^\circ\text{C}$  (39 mPa·s), es la E13+5.5 de la tabla 4.2.

Complementando la información anterior, con el objetivo de contar con un visión más general del comportamiento de las emulsiones OW, se determinó el efecto que tienen sobre las características reológicas, las características físicas de la emulsión, es decir, su distribución de tamaños de gotas y su composición agua/aceite, además del efecto de la temperatura, obteniéndose lo siguiente:

*Composición OW:* Es claro que la viscosidad de una emulsión depende entre otras cosas de las propiedades de los componentes y que para el caso de emulsiones O/W la viscosidad tenderá asintóticamente a la del agua cuando la cantidad de la fase dispersa tiende a cero, con las mediciones efectuadas se encontró que la disminución de la viscosidad con el contenido de agua es efectivamente exponencial, teniéndose un decaimiento de la viscosidad de 5 veces al duplicarse el contenido de agua de su valor original (de 13.4% a 29.4%) y llegando a una viscosidad similar a la del aceite usado en la emulsión, esto ocurre en la región donde la emulsión es una emulsión de alta fase interna donde los efectos sobre la viscosidad aparente dependen principalmente de la naturaleza de la distribución de tamaños de gotas. La duplicación del valor del contenido de agua de 29.4% al 60% reduce la viscosidad 10 veces su valor, es claro que el efecto predominante se debe a que la fase dispersa está cada vez menos concentrada. En cuanto a la naturaleza de la emulsión, ésta cambia de un fluido pseudoplástico a un newtoniano ocurriendo aproximadamente para una concentración de un poco más del 30% de agua, existiendo una transición suave en el comportamiento de pseudoplástico a newtoniano en cuanto a viscosidad se refiere.

*Distribución de tamaños de gota:* La distribución de tamaños de gotas produce evidentemente gran parte de las características reológicas de una emulsión por lo que es mucho más complejo su comportamiento. En este caso, se trató de ver el efecto de estas variaciones utilizando una emulsión en el rango pseudoplástico. Con ayuda del análisis dimensional, se logró obtener una correlación aceptable que indica un decaimiento exponencial de la viscosidad adimensional con el tamaño adimensional, en este caso la relación de un diámetro ponderado contra el diámetro Sauter.

*Temperatura:* De acuerdo con mediciones previas, la variación de la viscosidad con la temperatura ocurre exponencialmente pero más lentamente que los fluidos de origen, al menos esto ocurre así para emulsiones de alta fase interna como es la que se utilizó de base para generar los resultados (E13+0), sin embargo, este comportamiento cambia radicalmente cuando se tienen emulsiones diluidas ya que se encontró que en este caso la variación con la temperatura se da parabólicamente, variando muy lentamente en un amplio rango y con una caída significativa después de los 45°C.

*Velocidad de Corte:* Con el fin de seguir los protocolos que se habían definido en el LSC para medir viscosidad, se efectuaron las mediciones siguiendo una rutina de medición para 5 diferentes valores de velocidad de corte: 30, 60, 100, 200 y 400 s<sup>-1</sup>. De acuerdo con los resultados obtenidos se observó que en el caso de las emulsiones pseudoplásticas éstas siguen un comportamiento cuya viscosidad varía con  $(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^{-0.4}$ .

*Emulsión modelo:* se conjuntó la información necesaria acerca del comportamiento de emulsiones que, en conjunto con la información sobre la caracterización de mezcladores, da las bases para la producción de emulsión modelo en las cantidades suficientes para su uso en la fase de atomización, misma que se presenta en el capítulo siguiente.

## Capítulo 5. Sprays de emulsiones OW.

### 5.1. Introducción.

El interés fundamental de este proyecto de investigación doctoral, es como se menciona al inicio de esta tesis, el de conocer el comportamiento de una emulsión al paso por una boquilla de atomización, esto es, responder a estas preguntas: ¿la emulsión produce algún cambio en el spray ya sea en la distribución de tamaños de gota o en la morfología del spray?, ¿se rompe o destruye la emulsión al pasar por la boquilla?, ¿sufre cambios importantes la emulsión?. Buscando determinar estos efectos, se definieron las siguientes tareas: fabricación de la emulsión modelo a utilizarse en la boquilla, diseño de la instalación experimental, y en la fase experimental, determinar cualitativa y cuantitativamente los efectos de la emulsión. Se planteó el análisis del spray utilizando métodos ópticos, en particular, la determinación de la distribución de tamaños de gota mediante un sistema láser por difracción (inicialmente se había definido el uso de un sistema de anemometría de fase doppler (PDA), el cuál no estuvo disponible al momento de contar con los otros componentes), y en segundo lugar pero no menos importante, el análisis de la emulsión una vez que había pasado por la boquilla. En este caso también con el uso de un equipo para determinar distribución de tamaños de gota de emulsiones, basado en el mismo principio de difracción y utilizado en la etapa previa de análisis de emulsiones (capítulo 4). A continuación, se discuten muy brevemente los aspectos relacionados a la fase 4 de este proyecto, la producción de la emulsión; si bien, planteada muy escuetamente, de vital importancia en el desarrollo de la fase final. Sin la producción exitosa de la emulsión, no se podría hablar de los resultados de la fase experimental.

### 5.2. Producción de la emulsión modelo.

Con base en los resultados obtenidos en la fase anterior presentada en el capítulo 4, se definieron las características de la emulsión a utilizarse en la fase experimental, en resumen, una emulsión que tuviese una distribución de tamaños de gota predefinida, una estabilidad suficiente para utilizarla durante la fase experimental, y que tuviese una viscosidad cercana al aceite que se utilizaría en la misma fase experimental contra el cual se contrastarían los resultados de la emulsión modelo. En la tabla 5.1 se presentan las características relevantes de la emulsión modelo a producir: ésta, en cuanto a distribución de tamaños de gota, con las características de la emulsión E13 producida en laboratorio (cap. 4), y una viscosidad similar a la del aceite utilizado en los experimentos reportados en el capítulo 2.

Tabla 5.1 Características de emulsión modelo

Emulsión modelo	viscosidad [mPa]	DTG [ m]	estabilidad [días]
E21	~40	1 <D<100	>14

La producción de la emulsión modelo implicó pasar de la fase de laboratorio a una más de 40 veces más grande. En el caso de la producción de muestras en laboratorio, las cantidades involucradas estaban cercanas a los 800 g de emulsión, mientras que en la producción, las cantidades fueron del orden de los 35 kg. En el diseño de la instalación para fabricar la emulsión, se utilizaron principalmente los parámetros de diseño obtenidos en la fase de caracterización de mezcladores (cap. 3), con un esquema de tres rotores Rushton. Los resultados de la producción de emulsión fueron muy favorables en lo referente a DTG y estabilidad. La figura 5.1 muestra un comparativo entre la emulsión seleccionada (E13), y la emulsión modelo (E21) para la etapa final.

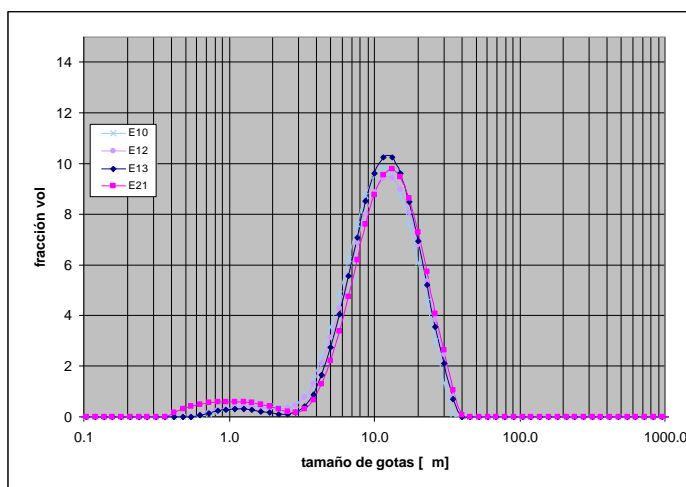


Fig. 5.1. Comparación entre emulsión de referencia y emulsión modelo.

Para ajustar el valor de la viscosidad con respecto a la del aceite utilizado en la caracterización de los sprays de referencia (cap. 2), se diluyó la emulsión E21 con agua, hasta obtener la viscosidad deseada. Las características fueron verificadas mediante un reómetro Haake con control de temperatura y de cortante, junto con un sensor de cilindros concéntricos. La viscosidad obtenida después de diluir la emulsión fue de 39 mPa·s.

### 5.3. Instalación experimental.

#### 5.3.1. Instalación para el análisis de sprays.

Para el análisis del spray de emulsión se tomó como base la instalación usada en la primera fase donde se caracterizó una emulsión de aceite utilizando PDA (cap. 2), sin embargo, se tuvieron que tomar en cuenta las características muy particulares de la nueva sustancia, esto es, se tenía la preocupación de evitar al máximo los cortantes por lo que no era deseable usar el sistema tal como estaba, particularmente el sistema de bombeo, tanto por su relativa lejanía, como por el tipo de bomba empleada, por lo que se concluyó que la emulsión debería ser impulsada al atomizador por otro medio: se utilizó un tanque a presión para esta acción, depositando inicialmente una cantidad de emulsión y presurizando el tanque, de manera que la presión produjera el empuje hacia la boquilla, reduciéndose los elementos restrictivos al flujo al mínimo, quedando como la única restricción importante, una válvula en la parte inferior del tanque. Inicialmente se había colocado un rotámetro para la medición del gasto de emulsión, pero fue necesario retirarlo, por la necesidad de requerir la limpieza después de cada uso y porque se estimó que algunas partes podrían dañarse. El gasto de aceite y el de emulsión fueron entonces determinados mediante volumen y tiempo, con un recipiente aguas abajo del spray. Aunque esta técnica fue utilizada repetidamente y con cuidado buscando repetibilidad y disminución del error, produjo los valores con mayor dispersión entre todos los medidos. En el caso de la línea de aire comprimido se contó con un elemento redundante para la medición de gasto ya que además de un rotámetro, se utilizó un flujómetro con lectura digital. Para la obtención de los datos que caracterizan el spray se utilizó un difractómetro de haz láser Malvern RTSizer, en lugar del equipo seleccionado al inicio de este proyecto (PDA), y que no estuvo disponible al momento de los experimentos. La figura 5.2 muestra un esquema de la instalación experimental.

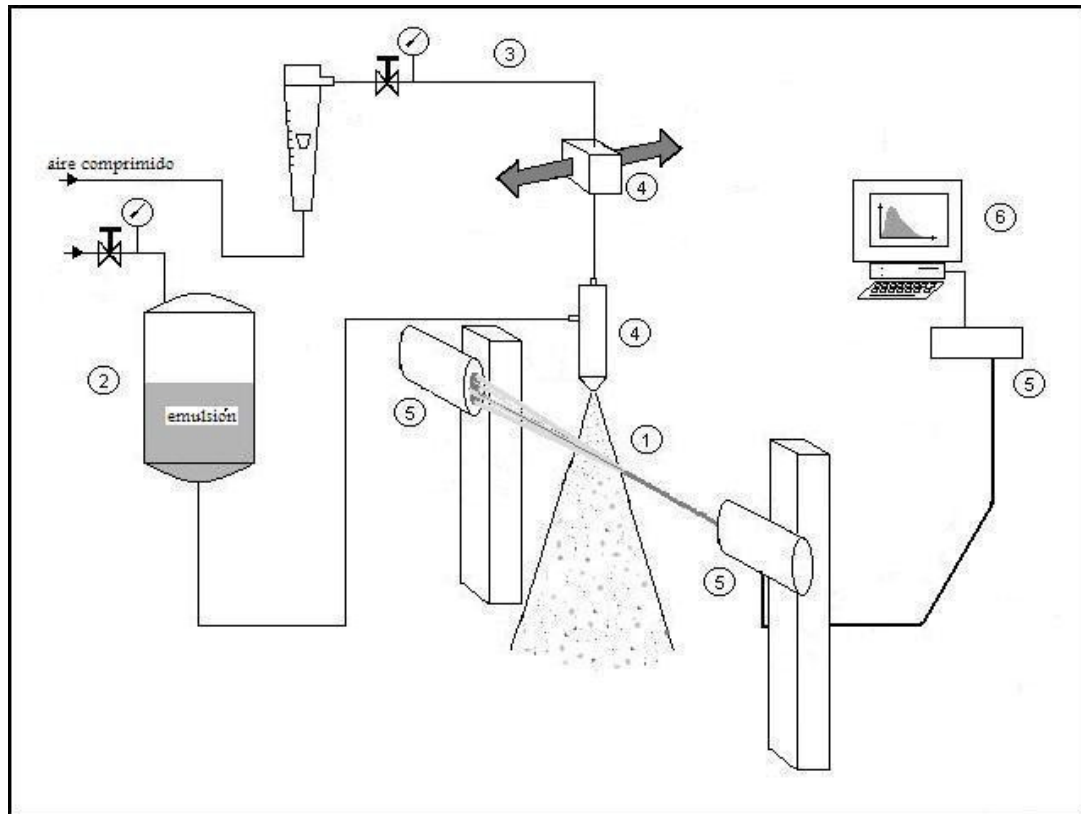


Fig. 5.2. Esquema de la instalación experimental.

Elementos de la instalación experimental (figura 5.2).

- spray de emulsión o aceite (1),
- tanque presurizado para inyección de emulsión (aceite) con regulador de aire integrado (2),
- línea de suministro de aire comprimido con regulador, rotámetro y flujómetro Omega (tipo capilar,  $\pm 1\%$  FS) integrado (3),
- boquilla de atomización comercial (aceite-aire), sujeta a mesa manual de coordenadas para su desplazamiento lateral (4),
- Malvern RTSizer con software de análisis y captura (5),
- Computadora personal con el software para captura y análisis (6).

Además del análisis con el MalvernRTSizer, se tomó evidencia fotográfica de los sprays para determinar el ángulo del spray.

### 5.3.2. Análisis de emulsiones después del paso por la boquilla de atomización.

Para el análisis de la emulsión después del paso por la boquilla de atomización, se capturaron muestras de éstas aguas abajo que se emplearon posteriormente para el análisis de DTG con el Malvern MasterSizer 2000, la inspección física de las mismas, y la determinación de las cantidades destruidas de emulsión por rompimiento.

Equipo de medición.

- Malvern Mastersizer 2000, muestra diluida en agua.
- Computadora personal con el software de Mastersizer 2000 para captura y análisis.



#### 5.4. Fase experimental.

Con la concreción de la fase experimental, se llegó al objetivo fundamental de este trabajo, analizar la emulsión presente en un spray producido por una boquilla de atomización comercial. Para obtener información relevante se plantearon cuatro series de experimentos: la primera para determinar el comportamiento de un spray de aceite-aire convencional con el fin de determinar la distribución espacial de los tamaños de gotas para una condición de referencia, la segunda para conocer su comportamiento al variar las condiciones de presión en la boquilla de atomización, en este caso, para la posición central del spray, estas series de experimentos dieron como resultado el punto de referencia o comparación para contrastar los resultados buscados. Las series tercera y cuarta fueron en las mismas condiciones de la primera y segunda, respectivamente, pero utilizando como fluido de trabajo la emulsión con las características ya definidas, (tabla 5.1). Como se comentó, se recopilaban muestras de cada emulsión después del paso por la boquilla para su análisis posterior.

Durante la realización de cada una de las series descritas, se hicieron mediciones previas y/o simultáneas de gastos de aceite (emulsión), de aire, así como toma de fotografías para cada configuración distinta.

Los resultados se agrupan en los siguientes apartados de la siguiente forma:

- Relación de presiones contra gasto.
- Relación de presiones contra Reynolds.
- DTG del spray: Espacial.
- DTG del spray: Efecto de la relación de presiones,  $r_p$ .
- DTG de la emulsión: Efecto del paso por la boquilla de atomización.
- Morfología del spray: Angulos de spray.
- Destrucción de emulsión.

##### 5.4.1. Relación de presiones contra gasto.

El planteamiento general al definir los experimentos a efectuarse, hacía necesario contar con parámetros que pudiesen modificarse de manera simple, por lo que observando el esquema de la instalación experimental, la solución directa conduce al uso de las presiones de inyección, tanto para el aceite -o emulsión-, como para el aire, mediante la operación de los reguladores acoplados, esto principalmente por su acción directa sobre las condiciones del spray, y la gran estabilidad en las lecturas, en contraste con los gastos involucrados. Aún cuando se tenía para el caso del suministro de aire una instrumentación redundante, esto es, un rotámetro y un flujómetro, la variación de las lecturas, la primera analógica, y la segunda digital, hacía mucho más difícil el control mediante este parámetro por lo que se decidió utilizar la presión de inyección del aceite (o emulsión), medida en el depósito presurizado, controlado mediante un regulador, y la presión de inyección del aire, aguas arriba de los medidores de gasto, controlada también con un regulador de presión. Con el fin de obtener una información más general, se decidió utilizar la relación de presiones de inyección de aceite (emulsión) a aire, usando en ambos casos la presión total, esto es

$$r_p = \frac{P_{tanque} + P_{atm}}{P_{aire} + P_{atm}}$$

Las presiones utilizadas para la emulsión o aceite corresponden entonces a la presión del aire en la cámara del tanque y la del aire a la presión en el punto de regulación, aguas arriba de la boquilla (fig. 5.2).

Aún cuando existían mediciones redundantes para el caso del aire, se obtuvieron resultados cualitativamente iguales pero se observó un ligero corrimiento de las mediciones del rotámetro con respecto a las del flujómetro, decidiéndose por las segundas en estos resultados, principalmente tomando en cuenta el error asociado a ambos equipos y la mayor variabilidad obtenida en el rotámetro. Las correlaciones de los datos obtenidos tanto para el aire en aceite como el aire en emulsión arrojaron valores por encima del 96%. El comportamiento del gasto de aire para los sprays de aceite y emulsión se presentan en las figuras 5.3 y 5.4, respectivamente.

Como se mencionó, la solución para obtener el gasto de aceite o emulsión fue la clásica de volumen contra tiempo y aunque se efectuaron numerosos experimentos con este fin, la dispersión de los resultados fue la más elevada entre las mediciones, a pesar de ello, se obtuvieron coeficientes de correlación mayores al 90%. El comportamiento del gasto de aceite y emulsión como función de  $r_p$ , se muestra en las figuras 5.5 y 5.6, respectivamente.

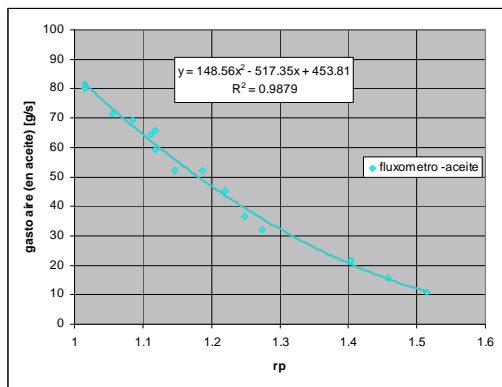


Fig. 5.3. Flujo de aire en función de  $r_p$ .

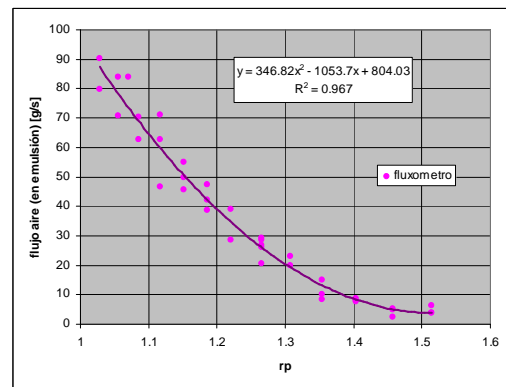


Fig. 5.4. Flujo de aire en función de  $r_p$ .

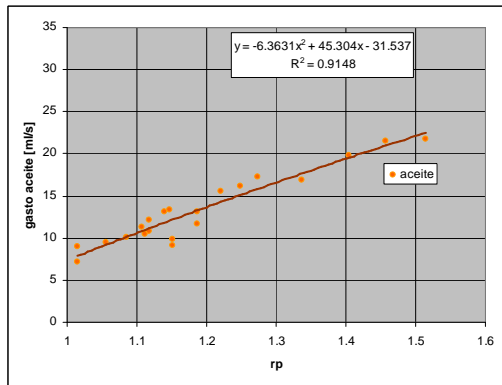


Fig. 5.5. Gasto de aceite en función de  $r_p$ .

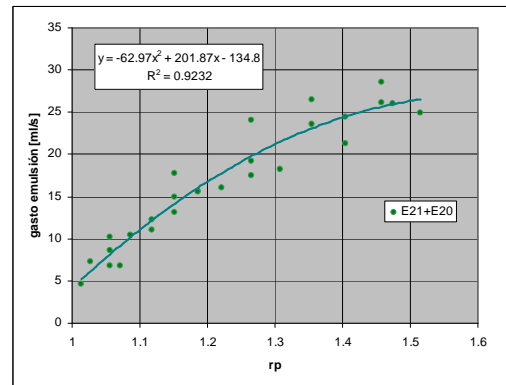


Fig. 5.6. Gasto de emulsión en función de  $r_p$ .

Con base en los ajustes encontrados para el comportamiento del gasto de emulsión, aceite y aire asociado, se pueden generar las curvas de la relación de masas de emulsión o aceite contra la  $r_p$ ; la figura 5.7 muestra las relaciones de masas mencionadas. En ambos casos se han ajustado nuevamente los valores obteniéndose curvas exponenciales de ajuste con coeficientes de correlación mayores al 99%. Se observa que para una  $r_p$  dada, la relación entre la masa de emulsión y la masa de aire es mayor para el caso de sprays de la emulsión que la de aceite cuando  $r_p$  es mayor a 1.1. La figura 5.8 muestra los flujos de emulsión y aceite.

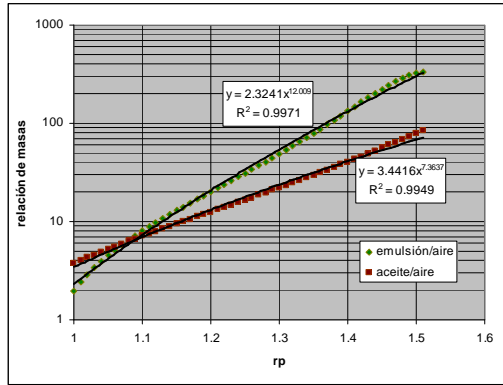


Fig. 5.7. Relación de masas en función de  $r_p$ .

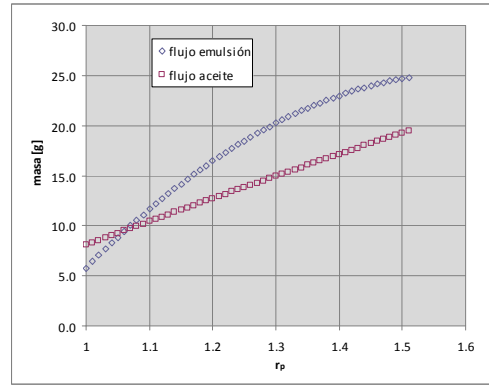


Fig. 5.8. Flujos e(a) en función de  $r_p$ .

#### 5.4.2. Relación de presiones contra Reynolds.

Aunque la variable de control típica deseada es el gasto, se mencionó que fue difícil controlar los experimentos usando esa variable por lo que se recurrió a la relación de presiones  $r_p$ . Sin embargo, es deseable obtener la relación que existe entre  $r_p$  y el gasto, o en términos más generales, en función de las otras características del spray: viscosidad de los fluidos utilizados, temperatura, por lo que se plantea una relación del tipo

$$r_p = f(U_s, D_0, T)$$

que usando el análisis dimensional fácilmente se puede transformar en

$$r_p = \left( \frac{U_s D_0}{\nu}, \right) = (Re_s, ),$$

o proponiendo en lugar de una temperatura adimensional, la relación de viscosidades entre una condición de referencia y la condición de operación,

$$r_p = \left( Re_s, \frac{\nu}{\nu_r} \right)$$

El cálculo de un número de  $Re_s$  representativo del spray, obligó a proponer una velocidad característica, definida a partir de los flujos involucrados, utilizando un balance de momentum, por lo que ésta se planteó como

$$U_s = \frac{m_e v_e + m_a v_a}{m_e + m_a}$$

para el caso de una emulsión, y

$$U_s = \frac{m_o v_o + m_a v_a}{m_o + m_a}$$

para el caso de aceite.

En el cálculo de las velocidades, se hicieron las siguientes suposiciones: para el aceite y la emulsión, se utilizó el flujo medido en combinación con el diámetro de la boquilla de atomización, en el caso de la velocidad de aire se tomó en cuenta la fracción de área que podría ocupar en la boquilla, haciendo el cálculo convencional y restringiendo la

velocidad máxima a las condiciones de bloqueo, tomando un coeficiente de velocidad de 0.9. Los resultados obtenidos por este medio fueron congruentes con los experimentos previos (cap 2.). En la figura 5.9, se muestran los valores de las velocidades calculadas. Utilizando los resultados de las mediciones experimentales ya mencionados, se obtuvieron las curvas que relacionan la  $r_p$  con  $Re_{D_0}$ , éstas se muestran en la figura 5.10

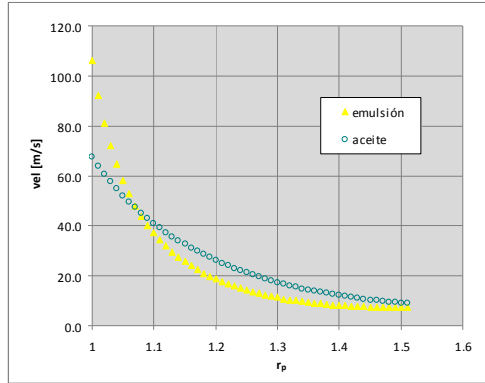


Fig. 5.9.  $U_s$  como función de  $r_p$

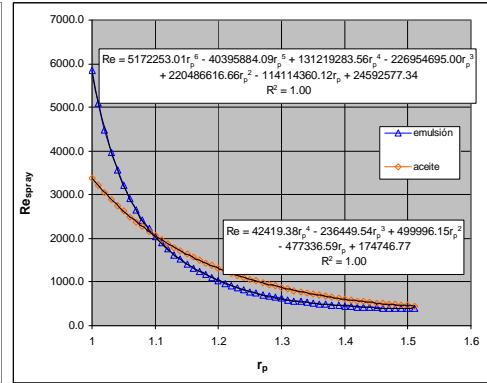


Fig. 5.10.  $Re$  como función de  $r_p$

Los valores de  $Re_s$  presentados en la figura 5.10 se obtuvieron a partir de datos que estuvieron fundamentalmente a temperatura ambiente por lo que cuando se opera el sistema a una temperatura más elevada, se debería esperar un comportamiento distinto, esto es, si la temperatura se incrementa, la viscosidad disminuirá lo que resulta en una potencia de bombeo menor, en este caso implicaría una relación de presiones más pequeña. Para tomar en cuenta el efecto de la temperatura, se propuso una relación de la forma

$$Re_{corr} = Re_s(r_p) \cdot \left[ \frac{\quad}{s} \right]^n$$

Utilizando los datos experimentales del capítulo 2 que se llevaron a cabo a temperaturas más elevadas, se obtuvo un valor de  $n \approx 2.27$ , esto es, el valor de  $r_p$  cuando la temperatura de un experimento en particular fuese la del ambiente, la relación de presiones equivalente debería ser mayor por el factor mencionado. El alcance de este trabajo no contempló un estudio detallado a diferentes temperaturas.

### 5.4.3. DTG del spray: Efectos de la posición transversal en el spray.

#### 5.4.3.1. Spray de aceite-aire

Con el fin de obtener características de referencia para comparar los resultados obtenidos para la emulsión de interés, se programaron experimentos para caracterizar el comportamiento de un spray convencional aceite-aire a una  $r_p$  establecida ( $r_p = 1.264$ ) y realizando un barrido lateral, cubriendo toda la zona del spray a intervalos regulares (1 cm). Por la naturaleza del equipo, todas las mediciones fueron efectuadas a una distancia constante aguas abajo de la boquilla de atomización (11 cm). En cada caso, las series fueron en más de una ocasión para verificar la repetibilidad que asegurara que el comportamiento mostrado fuera confiable. La figura 5.11, muestra los resultados obtenidos en cuanto DTG para 13 posiciones transversales cubriendo todo el spray, éstos se dan en fracción de volumen. Los tamaños de gotas están en el rango de 10 a 400  $\mu m$ , con una concentración máxima muy cercana a 200  $\mu m$ . En la región central (puntos 5 y 6)

se genera una región con una porción perceptible de gotas entre 10 y 20  $\mu\text{m}$ . Los perfiles de DTG son asimétricos con el máximo cercano a 200  $\mu\text{m}$  y un valor creciente de tamaños de gotas cercano a 90  $\mu\text{m}$  que produce una forma de silla hacia el centro del chorro. Las figuras 5.12 y 5.13, muestran los perfiles de DTG para cada lado del centro del spray, se observa que aunque hay buena simetría existe una pequeña asimetría, particularmente en los extremos del spray donde se alcanza la máxima diferencia en fracción volumétrica, con un valor de un punto porcentual. En el anexo se muestran curvas adicionales de DTG donde se comparan éstas a ambos lados del centro.

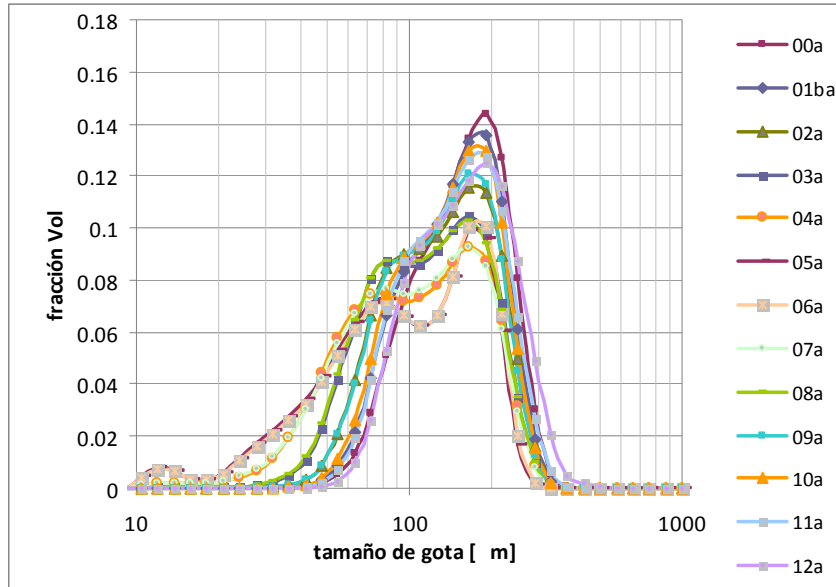


Fig. 5.11. DTG del spray aceite-aire en dirección transversal al flujo para  $z = 110\text{mm}$ .

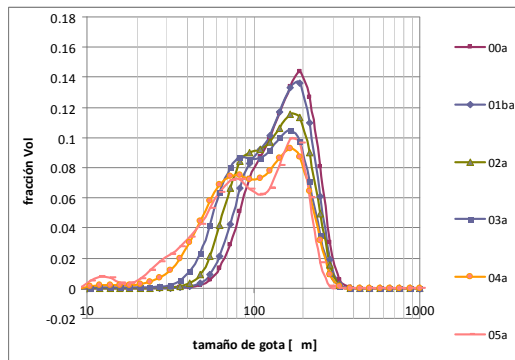


Fig. 5.12. DTG del spray aceite-aire a lo largo del spray desde el centro, a la frontera izquierda.

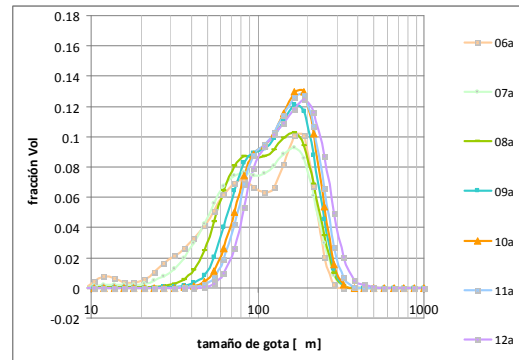


Fig. 5.13. DTG del spray aceite-aire a lo largo del spray desde el centro, a la frontera derecha.

Uno de los parámetros principales para describir a los sprays es el diámetro Sauter,  $D_{32}$ , que pueden obtenerse fácilmente con la información de cada diagrama de DTG en cada posición. La figura 5.14, muestra la distribución de  $D_{32}$  a lo largo de la posición transversal. Los datos confirman la buena simetría de los sprays analizados.

Como información adicional, se muestran en la figura 5.14 el efecto de dos parámetros sobre el comportamiento del spray, en primer lugar, el de la relación de presiones y en segundo lugar, pero no menos importante, el efecto de la

temperatura. Las temperaturas reportadas en la gráfica corresponden a la temperatura media entre el aceite y el aire, comentándose que siempre existió una diferencia en éstas cercana a 1.0 °C, a favor de la temperatura del aire. Puede notarse que a mayores  $r_p$ , el  $D_{32}$  se incrementa desplazando la curva hacia arriba; por otra parte, el efecto de la temperatura produce un efecto similar, desplazando la curva de igual forma. La figura 5.15 retoma los efectos comentados en la figura anterior, graficando en este caso el  $D_{32}$  central contra  $r_p$  y la temperatura como parámetro, es claro el efecto de ambos parámetros sobre el  $D_{32}$ .

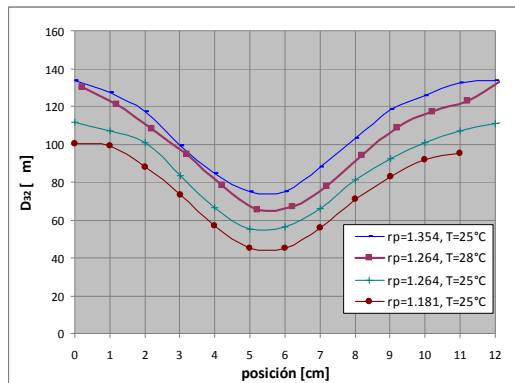


Fig. 5.14. Efecto de  $r_p$  sobre  $D_{32}$

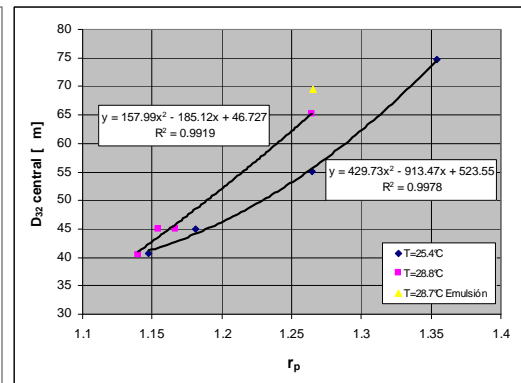


Fig. 5.15. Efecto de la temperatura sobre  $D_{32}$

#### 5.4.3.2. Spray de emulsión OW-aire.

Una vez caracterizado el spray convencional aceite-aire, se procedió a efectuar la caracterización de un spray de emulsión-aire en las mismas condiciones del spray anterior, esto es,  $r_p = 1.264$ , y  $T = 28.7^\circ\text{C}$ . Los resultados de las figuras siguientes, muestran las mismas características cualitativas, y las diferencias cuantitativas se describen más adelante. Como en el caso anterior, la figura 5.16 muestra la DTG para las posiciones medidas en dirección transversal cubriendo todo el spray, y las figuras 5.17 y 5.18, muestran las porciones izquierda y derecha del mismo spray. La porción derecha tiene porcentajes volumétricos en el extremo menores a 1 punto porcentual respecto al lado izquierdo. El rango de DTG en este caso es ligeramente menor, de unos 10 a unos 350  $\mu\text{m}$ , con una concentración máxima muy cercana a 200  $\mu\text{m}$ . La región central correspondiente a las gotas de tamaño más pequeño que se resalta en el spray anterior con una ligera joroba, ésta no es apreciable en este caso, disminuyendo más bien de manera gradual en ese mismo rango. Se nota también en este caso la formación de la “silla” causada por el crecimiento de tamaños de gotas cercano a 70  $\mu\text{m}$  lo que indica una mayor abertura del spray. En resumen, aun cuando los cambios son aparentemente pequeños cuando se comparan ambos sprays, en realidad éstos son significativos. Para evidenciarlos, se combinaron los resultados de  $D_{32}$  para ambos sprays, obteniéndose las figuras 5.19 y 5.20.

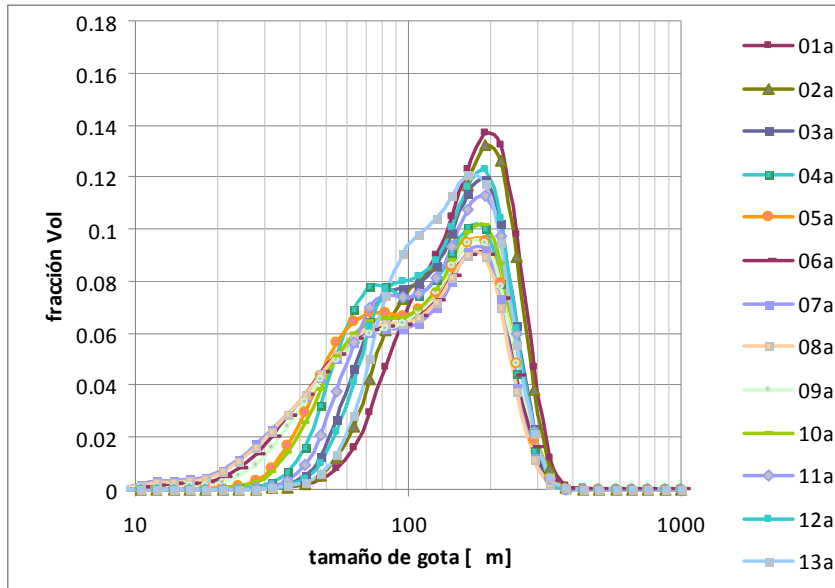


Fig. 5.16. DTG del spray emulsión-aire en dirección transversal al flujo, para  $z = 110$  mm.

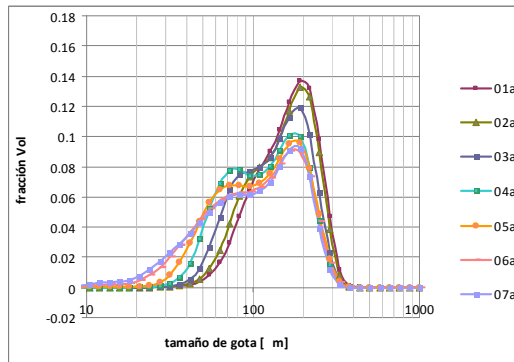


Fig. 5.17. DTG del spray emulsión-aire a lo largo del spray desde el centro, a la frontera izquierda.

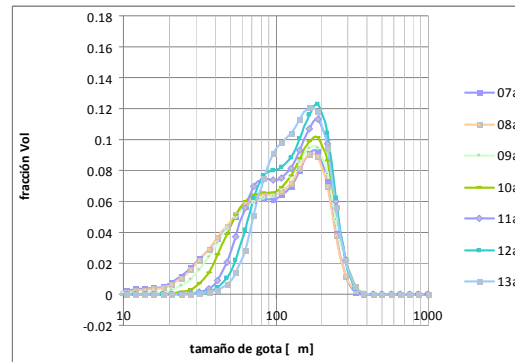


Fig. 5.18. DTG del spray emulsión-aire a lo largo del spray desde el centro, a la frontera derecha.

La figura 5.19, muestra el comportamiento de  $D_{32}$  para tres casos, el O-01, un spray de aceite con  $r_p = 1.181$ , la segunda O-02, un spray de aceite con  $r_p = 1.264$  y la tercera, al spray de emulsión de las figuras anteriores ( $r_p = 1.264$ ). La figura 5.20 muestra los gráficos de  $D_{32}$  normalizados utilizando el valor del  $D_{32}$  central (mínimo).

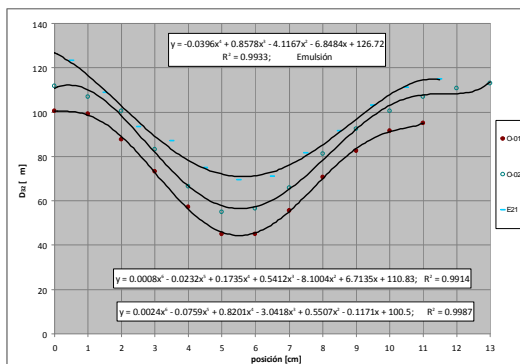


Fig. 5.19.  $D_{32}$  de sprays de aceite y emulsión.

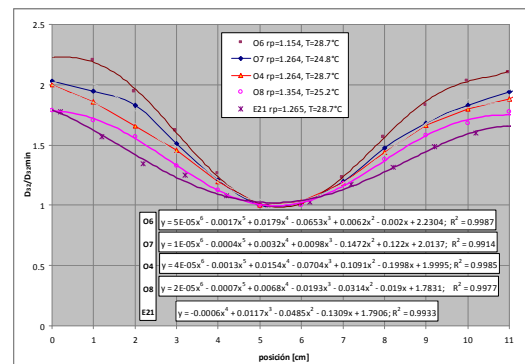


Figura 5.20.  $D_{32}$  normalizados contra  $r_p$ .

Los valores de  $D_{32}$  de la emulsión son significativamente mayores que los generados con sprays de aceite (fig. 5.19), al normalizar las curvas, se puede observar más claramente la mayor apertura del spray de emulsión. En ambas figuras se han incluido curvas polinómicas que se ajustan muy cercanamente a los valores experimentales, estando en todos los casos mostrados con un coeficiente de correlación mayor al 99%.

### 5.4.3.3. Comportamiento de tamaño de gota en función de la posición.

Para obtener más información acerca de la estructura espacial de los sprays, se utilizó la información de DTG para generar curvas de comportamiento espacial para cada tamaño de gota medido. Los resultados se aprecian en las figuras 5.21 y 5.22, para el caso de aceite y emulsión, respectivamente.

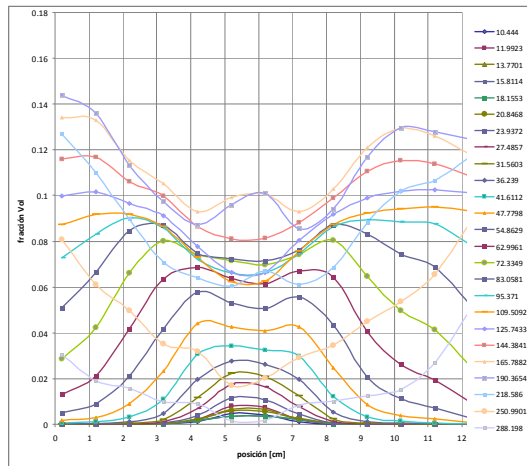


Fig. 5.21. Perfiles de tamaño de gota en función de la posición. Spray de aceite

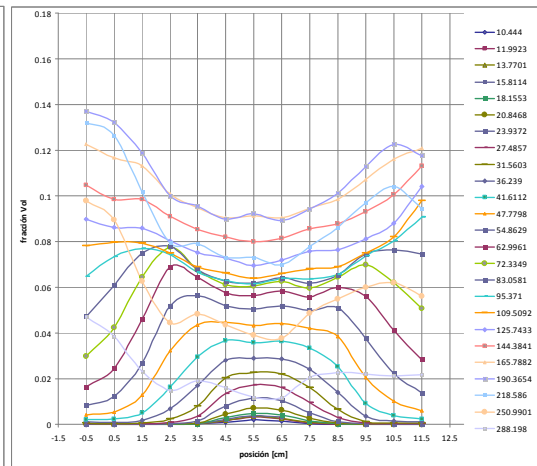


Fig. 5.22. Perfiles de tamaño de gota en función de la posición. Spray de emulsión.

A diferencia de las gráficas de DTG, en las gráficas generadas, se puede observar el comportamiento espacial de cada tamaño de gota medido, observándose de manera directa, la simetría de cada tamaño con respecto a la posición central del spray. En ambos casos, se puede notar una buena simetría del spray con algunas irregularidades, principalmente de gotas de tamaño mayor. El análisis detallado de la distribución espacial nos conduce a las siguientes observaciones: como se veía en las gráficas de DTG, los tamaños más pequeños de gotas están concentrados en cerca de 50 mm de la región central de spray con un valor máximo justo en el centro, y un porcentaje ligeramente mayor para el caso del spray de aceite, esto ocurre para gotas de tamaño 10.44 a 12.77  $\mu\text{m}$ ; para 15.81  $\mu\text{m}$ , los perfiles son prácticamente iguales ocupando un espacio de 50 mm; después de este valor, entre 18.15 y 41.61  $\mu\text{m}$  la tendencia se revierte, siendo mayor el porcentaje correspondiente a la emulsión, además de un valor mayor, también ocupan un espacio más ancho que en el caso del aceite, para el segundo valor de tamaños de gota, la concentración máxima es ligeramente mayor que la del aceite pero más relevantes es que ocupan un ancho mayor, de hecho cubren el total del espacio ocupado por el spray, mientras que las correspondientes al aceite ocupan unos 20 mm menos. Para 47.77  $\mu\text{m}$ , nuevamente el porcentaje de ambas se nivela pero sigue prevaleciendo una anchura mayor para el spray, a partir de 54.86  $\mu\text{m}$  el porcentaje del spray de aceite supera al de emulsión en la parte central, sin embargo no ocurre lo mismo con el espacio que ocupa la última que es siempre



mayor que la de aceite; esto ocurre hasta el tamaño 95.37  $\mu\text{m}$ . Se notó una mayor inestabilidad de las gotas grandes que conducen a comportamientos más erráticos. A partir de 95.37 $\mu\text{m}$  y cubriendo hasta el valor máximo de tamaño de gota medido, el porcentaje del spray de aceite supera al de emulsión; los porcentajes máximos ocurren afuera de la región central. En resumen, las gotas de tamaño pequeño tienden a estar en la región central y las más grandes en la periferia del spray. Toda la información comentada es congruente con la descripción de los sprays en cuanto a concluir que el de emulsión se abre más que el de aceite en las mismas condiciones de referencia. Esto se ratificará posteriormente con la evidencia gráfica.

#### 5.4.4. DTG del spray: Efecto de la relación de presiones, $r_p$

Se presentan en esta sección los resultados obtenidos de DTG para la posición central del spray variando en este caso la relación de presiones,  $r_p$ . Siguiendo la misma metodología, se realizaron sendos experimentos para determinar el efecto de  $r_p$  sobre la DTG de aceite y emulsiones. Las figuras 5.23 y 5.24 muestran la DTG para un rango amplio de valores de  $r_p$ , para la emulsión y el aceite, respectivamente. Nuevamente como en el caso de las DTG para la distribución espacial, el comportamiento cualitativo es muy semejante entre ambos sprays, pero se puede notar claramente que los valores máximos del spray de emulsión superan por 2 puntos porcentuales a los del spray de aceite. El comportamiento en ambos casos con respecto a  $r_p$  parte –variando  $r_p$  del valor máximo al mínimo- con la gráfica del extremo derecho, en ambos casos con un porcentaje máximo para un tamaño de gota de  $\sim 240 \mu\text{m}$  y avanzando secuencialmente hacia la izquierda, hasta llegar al valor mínimo de  $r_p$ . Al moverse hacia la izquierda al disminuir  $r_p$ , el tamaño de las gotas se hace más pequeño reduciéndose el valor porcentual máximo y aumentando los porcentajes del resto de las gotas, manifestándose una porción entre 70 y 100  $\mu\text{m}$  con un ligero incremento sobre el resto en el rango de  $r_p = 1.457$  a 1.354, en el caso de la emulsión, después de este valor, ese incremento en crecimiento del porcentaje es significativo causando un cambio en la forma del diagrama DTG. Para el  $r_p = 1.265$  es notable la aparición de una cresta en esa zona, entre 600 y 90  $\mu\text{m}$ , y en  $r_p = 1.221$  el tamaño de esa cresta cuyo máximo ocurre entre 600y 70  $\mu\text{m}$  supera marginalmente la cresta inicial que para ese valor de  $r_p$  se ha desplazado a un valor de  $\sim 150 \mu\text{m}$ , teniéndose una forma de silla de montar. El decremento de  $r_p$  sigue moviendo la DTG hacia la izquierda, desapareciendo eventualmente la cresta inicial y provocando ahora para los tamaños más pequeños, esto es, entre 10 y  $\sim 15 \mu\text{m}$  la aparición de una nueva cresta que se incrementa en tanto disminuye  $r_p$ .

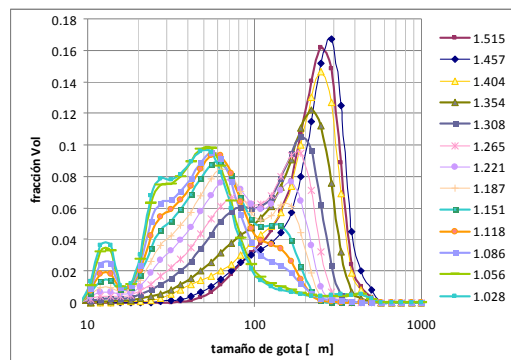


Fig. 5.23. DTG en función de  $r_p$  para una emulsión.

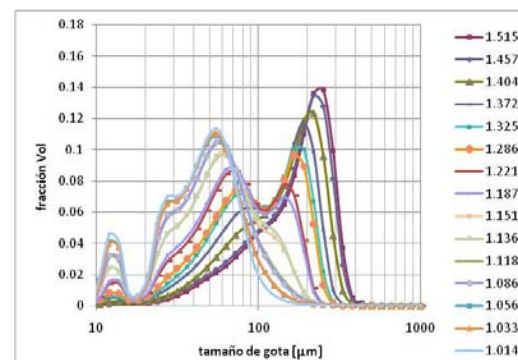


Fig. 5.24. DTG en función de  $r_p$  para un aceite.

Como en el caso de las gráficas de distribución espacial, se generaron a partir de los gráficos de DTG, las figuras siguientes, donde se muestra el comportamiento de cada uno de los diferentes tamaños de gotas que se producen, en función de  $r_p$ . Las figuras 5.25 y 5.26 contienen la información del comportamiento de las gotas en función de  $r_p$  para la emulsión y el aceite, respectivamente. Aun cuando las tendencias de los tamaños son muy semejantes, en este caso se ve que los valores obtenidos en el caso del aceite, están un poco más dispersos, mientras que los de la emulsión son más suaves. En términos generales los porcentajes de tamaños de gotas grandes se incrementan con  $r_p$  mientras que los pequeños y medianos disminuyen, habiendo un intervalo de ajuste entre las gotas pequeñas y las grandes donde primero crece el porcentaje para luego disminuir a valores más grandes de  $r_p$ . Es claro, sobre todo en la gráfica para la emulsión, que las fracciones máximas más pequeñas para todo el conjunto de gotas está cercano a  $r_p = 1.225$ .

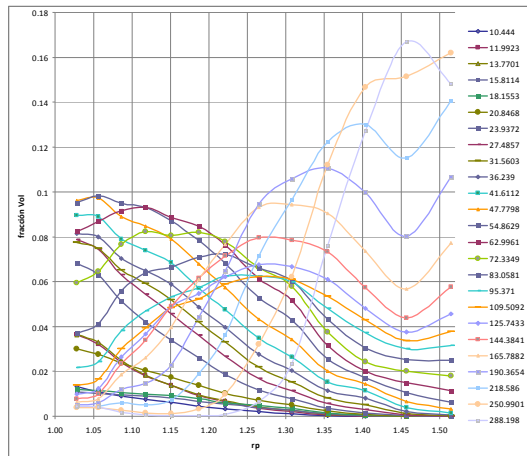


Fig. 5.25. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de emulsión

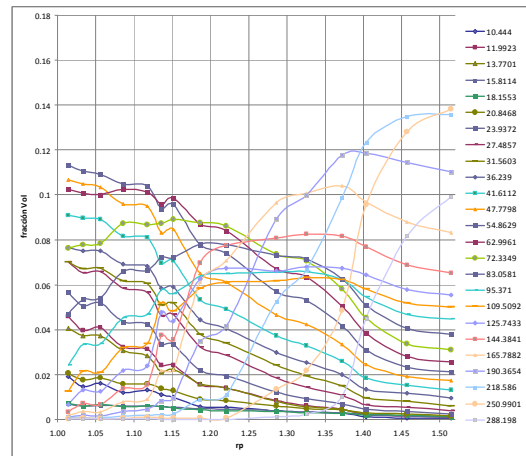


Fig. 5.26. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de aceite.

Con el fin de tener un panorama más claro, las gráficas anteriores se separaron en tres rangos, el primero que abarca tamaños de gotas desde 10.44 a 54.86  $\mu\text{m}$ , y mostrado en las figuras 5.27 y 5.28 para la emulsión y el aceite; el segundo, que abarca desde 62.99 a 144.88  $\mu\text{m}$ , mostrado en las figuras 5.28 y 5.29 para la emulsión y el aceite; y el tercero que abarca desde 165.88 a 288.19  $\mu\text{m}$ , mostrado en las figuras 5.30 y 5.31, respectivamente.

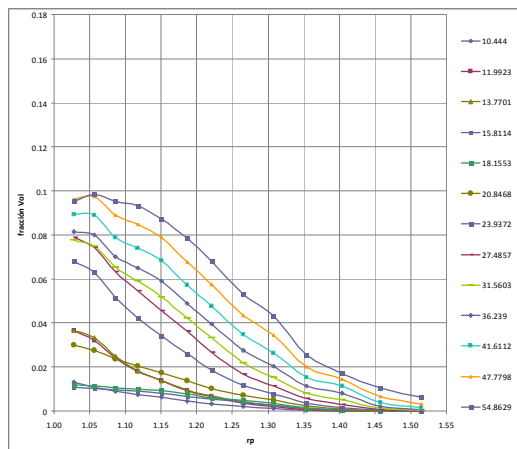


Fig. 5.27. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de emulsión. Intervalo 10.44-54.86  $\mu\text{m}$

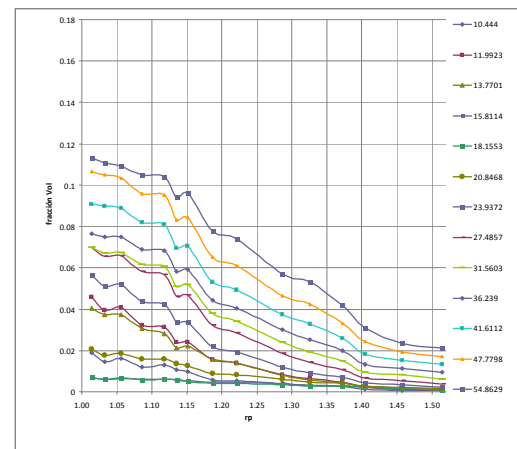


Fig. 5.28. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de aceite. Intervalo 10.44-54.86  $\mu\text{m}$

En el primer intervalo, los tamaños disminuyen de manera sostenida en todo el rango de  $r_p$ , sin embargo, las gotas de tamaño 54.86  $\mu\text{m}$  presentan valores más pequeños en el extremo inferior de  $r_p$ , incrementándose ligeramente a mayor  $r_p$  y después decayendo como el resto; además las fracciones del spray de aceite para  $r_p$  máximo, son alrededor del doble de los de la emulsión. En el siguiente intervalo, el comportamiento de las gotas es tal que inicia con fracciones que se incrementan con  $r_p$ , llegan a un máximo y luego disminuyen; cuando aumenta el tamaño de la gota a  $r_p$  mínimo, la fracción disminuye, el valor máximo de la fracción se desplaza a valores más elevados de  $r_p$ , y luego disminuye siendo la fracción mínima más baja en tanto el diámetro es menor. Nuevamente se nota que las fracciones de las gotas a  $r_p$  máxima son mayores para el spray de aceite. En el tercer intervalo, todos los tamaños empiezan con fracciones pequeñas a  $r_p$  mínimo y luego aumentan rápidamente con  $r_p$ , con cada tamaño desfasado a la derecha en tanto más grande. Las fracciones máximas alcanzadas por cada tamaño se dan empezando con el tamaño menor y siguiendo una secuencia donde el siguiente logra una fracción mayor que el anterior, ahora las fracciones más elevadas las tiene el spray de emulsión, además de que el incremento rápido de tamaños se da antes que en el spray de aceite. En las gráficas presentadas de la emulsión, se nota en la parte del extremo derecho un cambio en la tendencia de las curvas, se puede comentar que se deben al carácter fluctuante y a cierta inestabilidad del spray para el valor máximo de  $r_p$ , de hecho, durante la ejecución de los experimentos el spray cambió varias veces su patrón, de un spray a una cortina. No son fiables para ese valor de  $r_p$ .

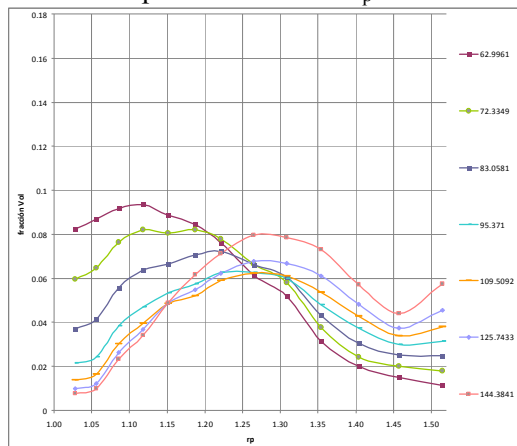


Fig. 5.29. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de emulsión. Intervalo 62.99-144.88  $\mu\text{m}$

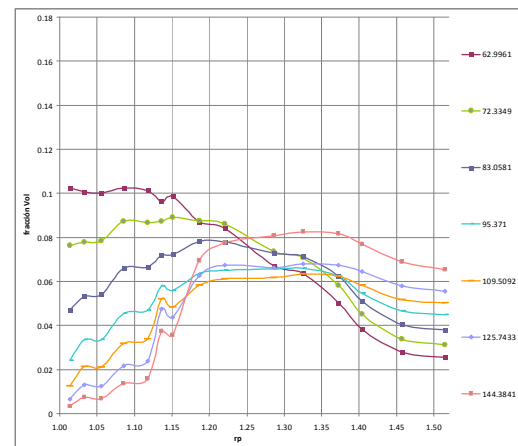


Fig. 5.30. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de aceite. Intervalo 62.99-144.88  $\mu\text{m}$

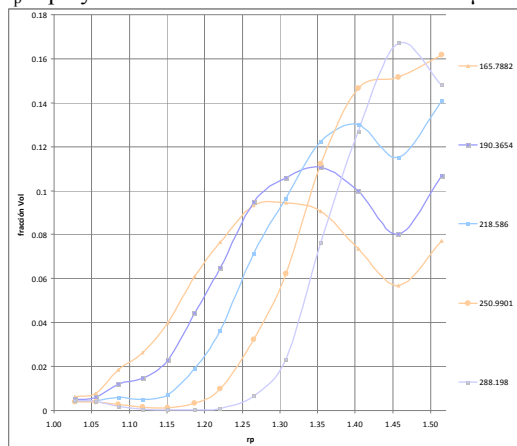


Fig. 5.31. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de emulsión. Intervalo 165.88 a 288.19  $\mu\text{m}$

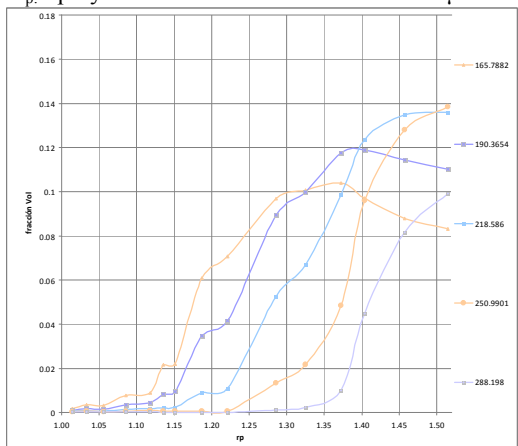


Fig. 5.32. Perfiles de tamaño de gota en función de  $r_p$ . Spray de aceite. Intervalo 165.88 a 288.19  $\mu\text{m}$

En resumen, las gráficas anteriores permiten confirmar que el spray de emulsión en condiciones de  $r_p$  alta es más inestable -en el sentido del desarrollo propio de un spray en lugar de una cortina de líquido-, por lo que existen porcentajes más elevados de los tamaños mayores en la zona de  $r_p$  altas en detrimento de las gotas de tamaño menor comparados con un spray convencional. Los porcentajes de las gotas más grandes se reducen a valores mayores de  $r_p$  con una pendiente similar a la de aceite, en general los tamaños más pequeños tienen porcentajes más bajos en el spray de emulsión. Para  $r_p \approx 1.225$ , se producen los porcentajes más bajos para todo el conjunto de gotas, particularmente más claro este valor en las emulsiones, lo que podría considerarse una buena opción desde el punto de vista de operación de la boquilla. A partir de ese punto, a la derecha los porcentajes de las gotas más grandes dominan la DTG, y a la izquierda, las gotas medianas y pequeñas. Pareciera obvio desear estar ala izquierda pero eso tiene varias implicaciones, por un lado el gasto de aire y energía para impulsarlo aumenta, y por otro lado en el caso de las emulsiones, la posible destrucción de la emulsión, aspecto que se discute más adelante.

Con el fin de aterrizar los resultados presentados, una vez más se recurre a examinar el comportamiento del diámetro Sauter,  $D_{32}$ , como se hizo en el análisis de la distribución espacial, utilizando a  $r_p$  como la variable independiente, en lugar de la posición transversal. La figura 5.33 muestra el comportamiento de  $D_{32}$  en función de  $r_p$  tanto para el spray de aceite, como el de emulsión. Paradójicamente, aunque las gráficas 5.26 y las asociadas a ella mostraron ciertas irregularidades -que no alteran las tendencias generales-, los valores de  $D_{32}$  obtenidos de los DTG de la figura 5.24 y otras no mostradas, mostró una tendencia con una dispersión más baja que los obtenidos de los DTG de emulsión. En ella se observa una clara diferencia en comportamiento para los sprays: el de emulsión genera valores de  $D_{32}$  siempre más elevados que los generados en un spray de aceite, aunque esa tendencia se nulifica para valores de  $r_p \approx 1.15$  y menores, donde los valores de ambos sprays, son prácticamente iguales. La figura 5.34, muestra la relación entra ambos tamaños, se observa que  $D_{32}$  para las emulsiones es 1.4 veces más grande para  $r_p = 1.5$ , con una tendencia de  $r_p^2$  para todo el rango.

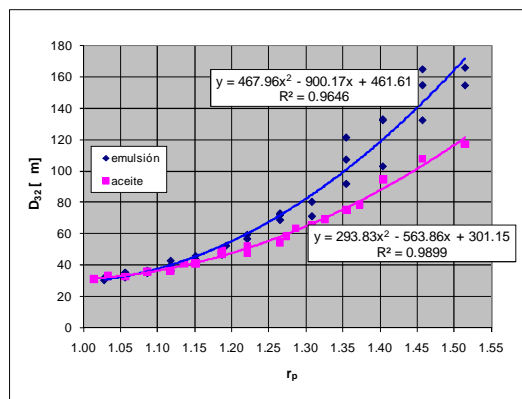


Fig. 5.33  $D_{32}$  en función de  $r_p$ .

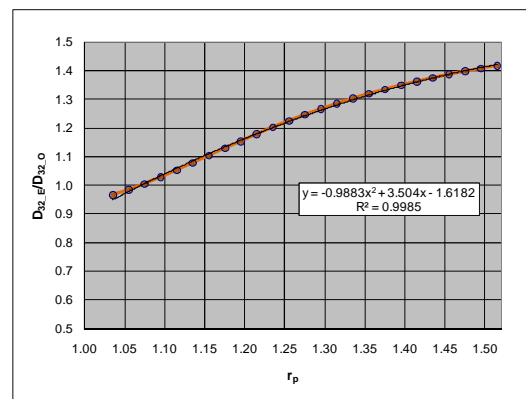


Fig. 5.34  $D_{32\_E}/D_{32\_O}$  en función de  $r_p$ .

### 5.5. Morfología del spray: aceite-aire, emulsión-aire.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, como parte integral del desarrollo experimental, se tomó evidencia fotográfica que complementa los datos obtenidos; además de mostrar las imágenes de los sprays -que se presentan en los anexos de este trabajo-, se obtuvieron a partir de ellas, los ángulos del spray para cada condición probada. En la figura 5.35 se muestran los resultados de estas mediciones; en ella, se

incluye también el ángulo del spray para el caso en el que la boquilla opera solamente con aceite, sin el aire auxiliar. Puede notarse que para  $r_p = 1.0$  los ángulos son prácticamente iguales pero luego la diferencia se hace importante, aumentando cuadráticamente, con una diferencia máxima de 43% del spray de emulsión sobre el de aceite para  $r_p \approx 1.22$ , y luego la diferencia se hace menor ya que el ángulo del spray de aceite tiene un comportamiento casi lineal. En la gráfica se incluyó el valor del spray utilizado en los experimentos llevados a cabo con PDA.

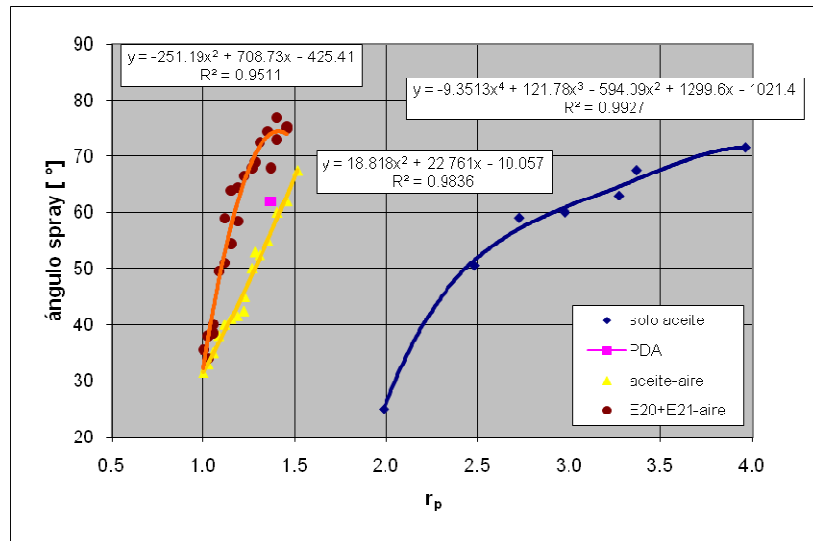


Fig. 5.35. Angulos de sprays en la boquilla de atomización: solo aceite, aceite-aire, emulsión-aire.

### 5.6. DTG de la emulsión: efecto del paso por la boquilla de atomización

En las secciones anteriores se presentaron los resultados obtenidos a partir del análisis de los gráficos de DTG. Se muestran las diferencias producidas en el spray cuando se utiliza una emulsión en lugar de un aceite en condiciones semejantes; las diferencias notorias entre ambos, se deben evidentemente a la emulsión. Sin embargo, nada de lo que se ha presentado nos da información acerca del comportamiento de la emulsión en sí, aunque se infiere que deberían tenerse diferencias en ella. Con el fin de conocer qué efectos tiene sobre la emulsión el paso por la boquilla de atomización, se capturaron muestras de ésta aguas abajo durante el desarrollo de los experimentos. Estas fueron analizadas posteriormente en el difractómetro Malvern MasterSizer 2000. Los resultados de la determinación de DTG de la emulsión se muestran en las gráficas 5.36 a 5.40 que se presentan enseguida.

Las figuras 5.36 muestra la DTG de la emulsión E20 probada; ésta se utilizó exclusivamente para obtener fotografías y para ver el efecto del paso por la boquilla ya que el tamaño del lote era insuficiente para las pruebas de spray con el RTSizer. En la figura 5.37 se muestra la DTG de las emulsiones E20 y E21, ambas figuras ofrecen la misma información. Puede notarse en ellas que la DTG se corre hacia la izquierda en tanto disminuye la  $r_p$ , disminuyendo el valor del porcentaje máximo, y apareciendo un crecimiento sostenido de las gotas de menor tamaño, en el rango de 10 a  $\sim 22 \mu\text{m}$ . Se nota en la figura que para  $r_p = 1.261$  la diferencia en DTG con la emulsión de referencia es marginal, los cambios en DTG se notan a partir del segundo valor, esto es,  $r_p = 1.221$ . A partir de las gráficas de DTG se generaron las gráficas de las figuras 5.38 a 5.40, que muestran el comportamiento del tamaño de cada lote de gotas de emulsión en función de  $r_p$ . La figura 5.38 muestra el total de tamaños de lotes de gotas de la emulsión.

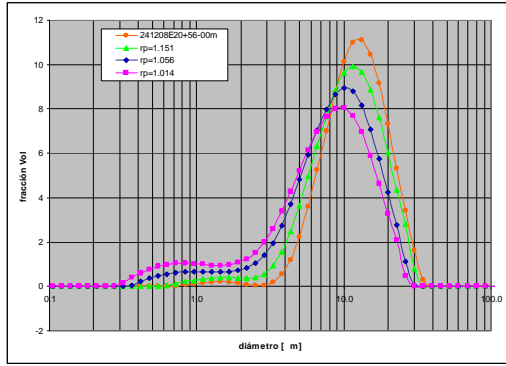


Fig. 5.36. DTG de E20 en función de  $r_p$ .

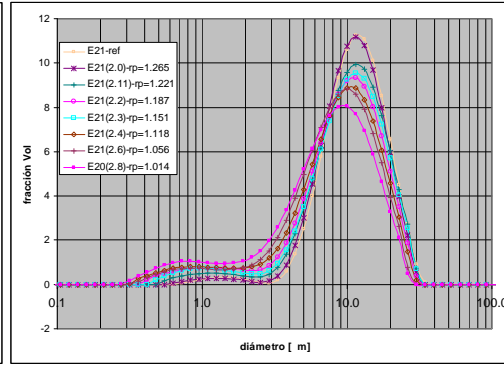


Fig. 5.37. DTG de E20 y E21 en función de  $r_p$ .

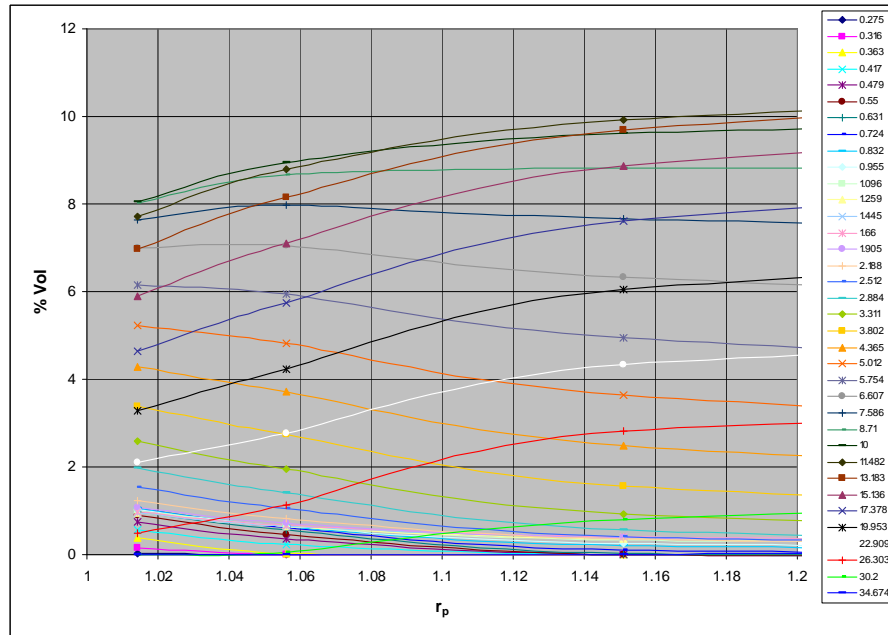


Fig. 5.38 Comportamiento del tamaño de gota en función de  $r_p$ .

Esencialmente, existen tres grupos de tamaños de gotas en cuanto a comportamiento, las que disminuyen su porcentaje, las que lo incrementan cuando  $r_p$  aumenta, y un rango intermedio. El primer grupo incluye a las gotas pequeñas, desde el valor mínimo de 0.275 hasta 5.754  $\mu\text{m}$ ; el segundo grupo incluye a las gotas más grandes, en el rango que incluye desde 11.482 hasta 34.574  $\mu\text{m}$ , todas aumentan con  $r_p$  y su concentración es menor entre más grandes son, en ningún caso se cruzan los porcentajes de este grupo que se muestra en la figura 5.39. En el tercer grupo, las gotas de 6.607 y 7.586  $\mu\text{m}$  primero tienen un incremento marginal, llegando a un máximo cuando  $r_p \approx 1.05$  y luego disminuyen suavemente, las gotas de 8.71  $\mu\text{m}$  incrementan su porcentaje y luego se mantiene constante en todo el rango, finalmente, las gotas de 10  $\mu\text{m}$  incrementan su porcentaje pero con una pendiente menor a las del segundo grupo, todas ellas se muestran en la figura 5.40 junto con las del primer grupo. En resumen, para  $r_p$  elevadas, el spray está formado principalmente de gotas del segundo y tercer grupo con un  $\sim 59\%$  para el primero, y  $\sim 31\%$  el segundo, respectivamente, las del segundo disminuyen monótonamente hasta llegar al  $\sim 31\%$ , mientras que las del primer grupo pasan del  $\sim 9\%$  a un poco más del 38%.

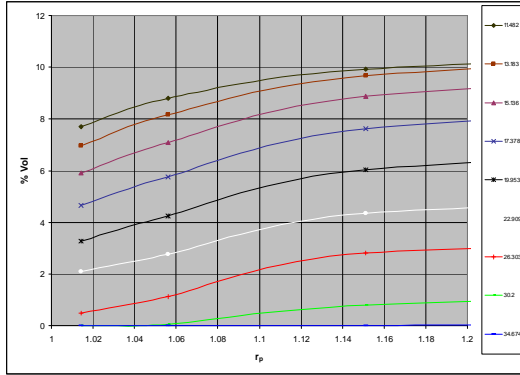


Fig. 5.39. Comportamiento del tamaño de gota en función de  $r_p$ . Segundo grupo.

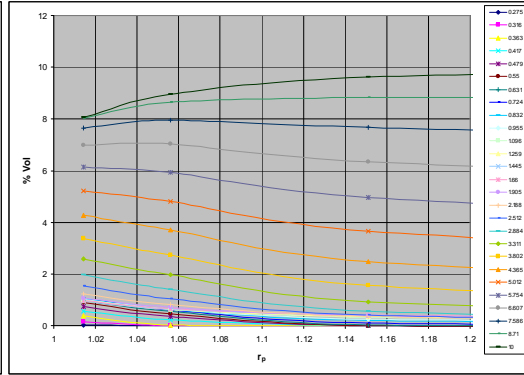


Fig. 5.40. Comportamiento del tamaño de gota en función de  $r_p$ . Primer y tercer grupo.

Con el fin de visualizar simultáneamente los diagramas de DTG de la emulsión y el del spray de la boquilla de atomización, se construyeron las figuras 5.41 a 5.51. En la primera se muestran simultáneamente todas las gráficas correspondientes a la DTG del spray generado por la boquilla de atomización (fig. 5.23), con las gráficas de DTG de la emulsión después del paso por la boquilla (fig. 5.37). Las figuras 5.42 a 5.50 muestran exclusivamente las DTG para un spray y una emulsión a un valor fijo de  $r_p$ , mientras que la figura 5.51 es una representación del spray de emulsión utilizando la figura 5.45. El objetivo de estos gráficos fue el de observar influencias de la DTG de la emulsión en la del spray. De la figura 5.42 queda claro que todas las gotas del spray contienen a las gotas de la emulsión al ser éstas un orden de magnitud menor. Conforme se reduce  $r_p$ , la DTG del spray se va corriendo sucesivamente a la izquierda, y aunque en menor medida, lo mismo ocurre con la DTG de la emulsión si bien para  $r_p = 1.265$ , el cambio sufrido es marginal. El corrimiento de ambas curvas al disminuir  $r_p$ , indica que las gotas más grandes del spray se rompen formando ya sea gotas más pequeñas que aún contienen la emulsión, o simplemente, rompiéndose totalmente por lo que se tendría a partir de ese momento el contenido de cada gota de spray destruida, esto es, agua y gotas de aceite. Entonces, a partir del rompimiento total de las gotas del spray se tiene la presencia de dos fluidos que inicialmente estaban confinados, el agua y el aceite, por lo que es claro que se esperaría un efecto sobre las características macroscópicas del spray. Se observa que a partir de  $r_p = 1.221$  aparece una pequeña cresta situada en  $\sim 10 \mu\text{m}$ , que incrementa su fracción en tanto disminuye  $r_p$  y que casi coincide con el valor máximo de la DTG de la emulsión, por lo que se podría pensar que refleja o es producto de las gotas de emulsión, sin embargo, la revisión de los sprays de aceite (fig. 5.24) muestra que es producto de la  $r_p$ , así que de haber un efecto este es marginal.

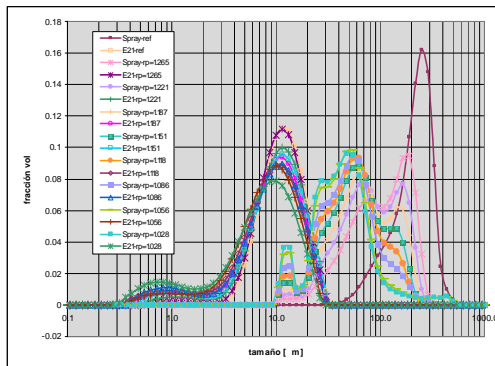


Fig. 5.41. DTG's de emulsión y spray

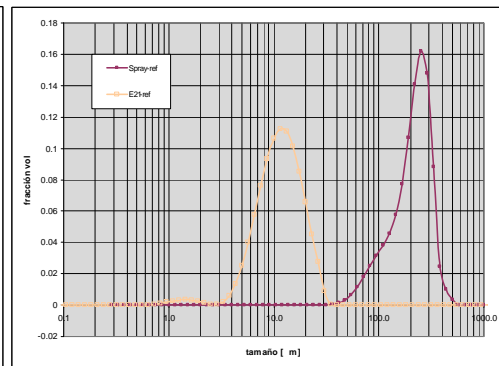


Fig. 5.42. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.515$

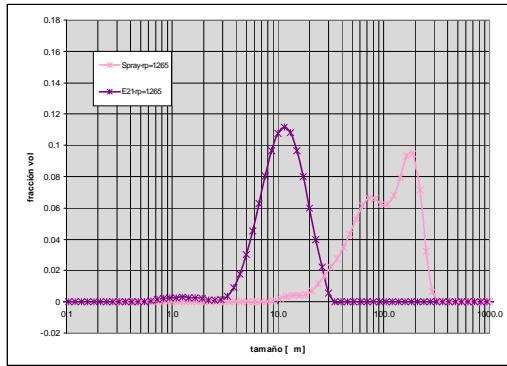


Fig. 5.43. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.265$

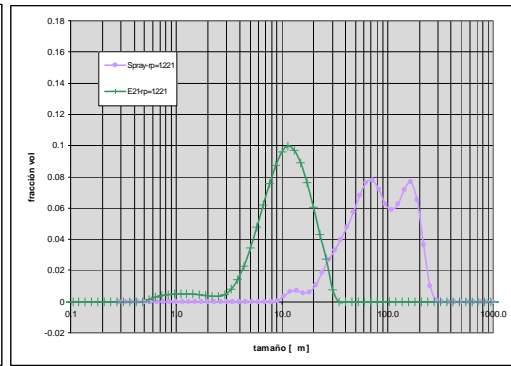


Fig. 5.44. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.221$

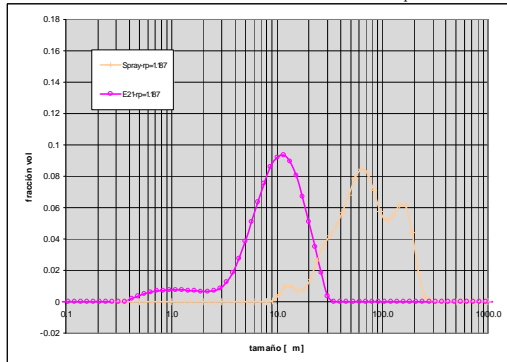


Fig. 5.45. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.187$

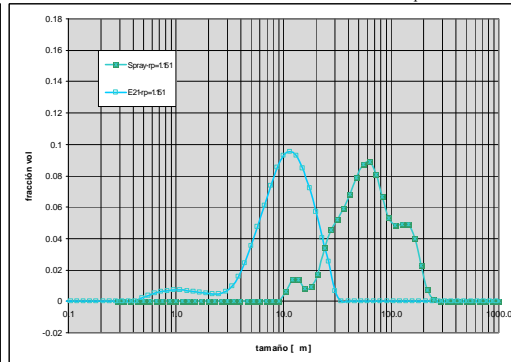


Fig. 5.46. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.151$

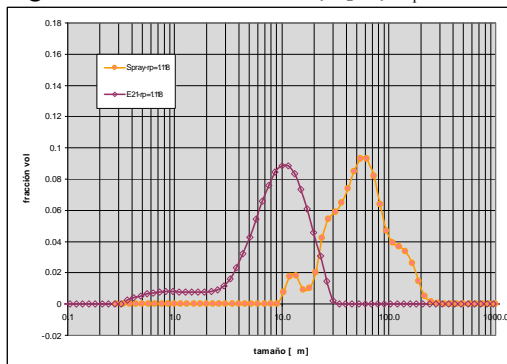


Fig. 5.47. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.118$

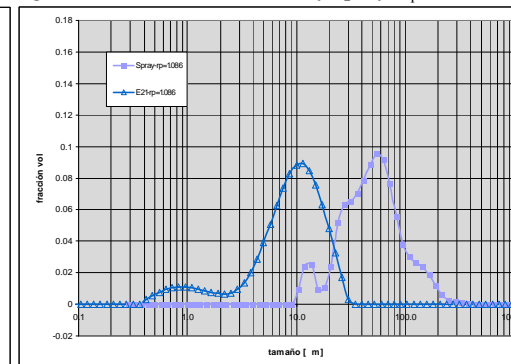


Fig. 5.48. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.086$

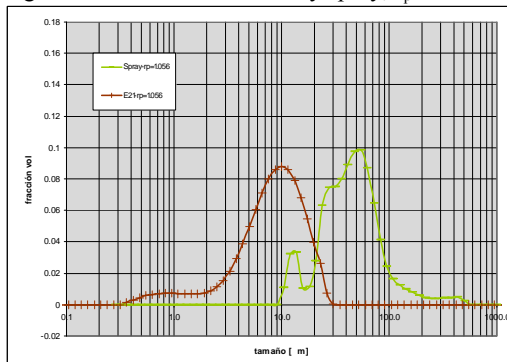


Fig. 5.49. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.056$

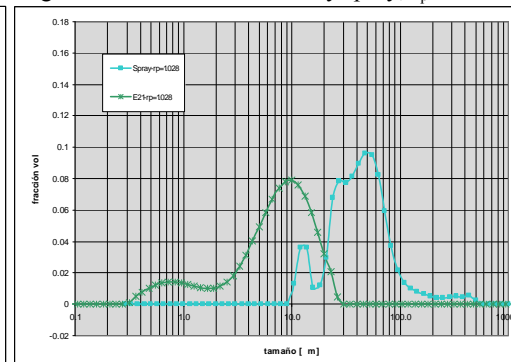


Fig. 5.50. DTG's de emulsión y spray,  $r_p=1.028$

Finalmente, los DTG de emulsión también muestran una cresta que se incrementa con  $r_p$  con fracciones máximas entre 6 y 8  $\mu\text{m}$ . Es improbable que se formen gotas de tamaño pequeño a partir de gotas más grandes, por lo que se infiere que ya hayan estado ahí



formando por floculación gotas más grandes, y que por el efecto del rompimiento de las gotas de spray, se separen originando su incremento.

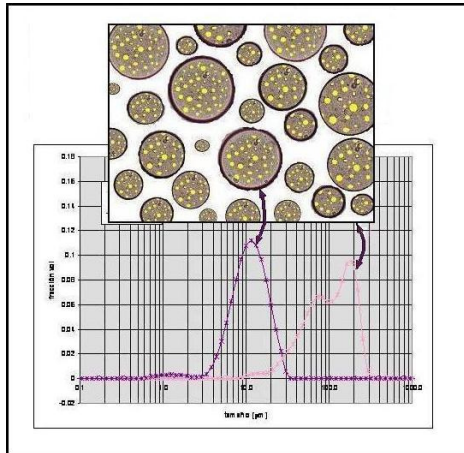


Fig. 5.51. Representación de gotas del spray

### 5.7. Destrucción de emulsión.

Una de las preguntas originales al plantear este proyecto, fue saber si la emulsión sería destruida al hacerla pasar por la boquilla de atomización en virtud de los esfuerzos cortantes. Paradójicamente, la fabricación de la emulsión se realiza por cortante, pero en general, éstas son susceptibles a los cortantes. Parte de la respuesta a esta pregunta se resuelve con lo ya presentado ya que se pudo observar que la emulsión prevalece, aunque con ligeros cambios, aunque el análisis de los DTG no da toda la respuesta. Para ello, durante el desarrollo de los experimentos, se recolectaron muestras que sirvieron adicionalmente con este propósito. La inspección de las muestras recogidas confirmó que sí existe destrucción de la emulsión siendo marginal en tanto más elevada es la  $r_p$ , y se incrementa lentamente cuando  $r_p$  disminuye; a partir de valores de menores a  $r_p \sim 1.22$  la destrucción de la emulsión crece rápidamente. Utilizando las imágenes capturadas, se calcularon los porcentajes volumétricos de emulsión destruida. La figura 5.52 muestra los resultados obtenidos. Existió una diferencia significativa entre las emulsiones utilizadas, mientras la E20 lleva a valores de  $\sim 40\%$  de emulsión destruida, la E21 dio valores muy superiores, estimándose la destrucción total antes de llegar a  $r_p = 1.0$ . Las razones de estas diferencias se desconocen pero se le podrían atribuir a las diferencias entre los aceites utilizados en la fabricación, ya que aunque nominalmente fueron los mismos, los análisis reológicos dieron resultados un tanto diferentes.

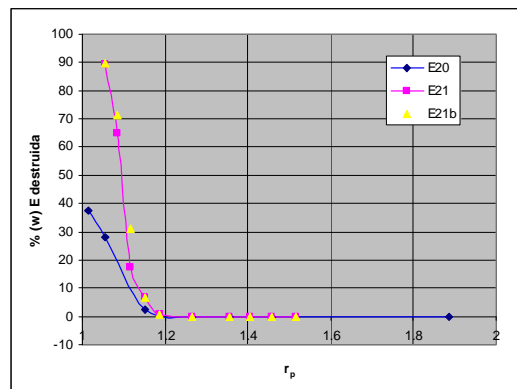


Fig. 5.52. Destrucción de la emulsión con respecto a  $r_p$

Se desconoce la localización donde ocurre la ruptura de la emulsión, pero resulta más lógico que esto se de aguas arriba en la cercanía o aún, dentro de la boquilla de atomización, de manera que al romperse, además de las gotas de emulsión, el spray contiene gotas de agua y de aceite, lo que también modifica las condiciones del spray.

### 5.8. Parámetros adimensionales.

Queda por responder si está garantizada la formación completa del spray en la zona de medición. La respuesta debe ser si, basada en la evidencia experimental ya reportada en el capítulo 2. Retomando esa información, se calcularon los principales parámetros adimensionales involucrados, esto es, los números de Reynolds  $Re$ , Weber  $We$  y Ohnesorge  $Oh$ . A pesar de que se ha trabajado mucho en la atomización y el rompimiento de gotas, no existe un criterio uniforme sobre cuando se dan los distintos tipos identificados y como consecuencia se reportan diversos valores de esos parámetros. En la tabla 5.2, se presentan los valores de los parámetros adimensionales de la presente investigación para el caso de la emulsión dependiendo de cómo se definen las variables físicas que se utilizan en el cálculo de los grupos adimensionales.

Tabla 5.2. Parámetros adimensionales

$r_p$	Re				We				Oh			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
1.500	386.0	1052.1	27.6	46.9	1488.34	1.88	106.29	180.69	0.100	0.001	0.005	0.004
1.265	716.8	1953.9	22.4	38.0	5133.26	6.50	160.11	272.19	0.100	0.001	0.007	0.006
1.221	915.3	2495.0	23.9	40.7	8369.94	10.60	218.93	372.18	0.100	0.001	0.008	0.006
1.187	1102.8	3006.1	25.1	42.8	12149.72	15.39	277.07	471.01	0.100	0.001	0.009	0.007
1.151	1411.6	3847.8	27.9	47.4	19906.10	25.21	393.53	669.01	0.100	0.001	0.009	0.007
1.118	1764.5	4809.7	30.8	52.3	31103.28	39.39	542.68	922.56	0.100	0.001	0.010	0.008
1.086	2343.5	6387.9	36.6	62.3	54863.57	69.48	857.30	1457.41	0.100	0.001	0.010	0.008
1.056	3005.2	8191.5	42.9	73.0	90219.25	114.26	1289.35	2191.90	0.100	0.001	0.011	0.008
1.028	3997.7	10897.0	53.5	90.9	159654.88	202.20	2135.90	3631.04	0.100	0.001	0.011	0.009

Donde las condiciones (1), (2), (3), y (4) se evalúan de la siguiente manera

- (1) Con  $e, D_0, U_e, e, e$
- (2) Con  $a, D_0, U_e, a, e$
- (3) Con  $e, D_{32\text{-central}}, U_e, e, e$
- (4) Con  $a, D_{32\text{-máx}}, U_e, a, e$

Con el propósito de ubicar las condiciones de operación del atomizador bajo estudio, se puede observar de la tabla 5.2, que el valor de  $We$  del segundo caso corresponde al rompimiento en multi-modos [2]. Si se considera el  $We$  del tercer caso, entonces se podría decir que las gotas sufren variaciones moderadas en su forma [26]. Estando muy cercano el régimen de atomización. Si se utiliza la información de [2] donde la longitud crítica de ruptura depende de  $We^{-2/5}$  y ajustada por [118], se tiene que ésta es de  $\sim 1.7$  mm lo que la coloca fuera de la zona que el sistema de medición puede alcanzar. Los valores del  $Oh$  son pequeños en todos los casos por lo que se puede aceptar que el efecto de la viscosidad es pequeño en el fenómeno. Con base en lo anterior, se concluye que el régimen en la zona de medición es de atomización donde el diámetro de las gotas es mucho más pequeño que el diámetro de la boquilla, en este caso, el valor máximo de tamaño de gotas medido da una relación de  $\sim 1/6$  con respecto al diámetro de la boquilla.

### 5.9. Incertidumbre y limitaciones de los resultados presentados.

Los resultados mostrados en este capítulo tienen algunas limitaciones que surgen de la naturaleza de los equipos utilizados en las mediciones, que conducen también a la incertidumbre de los resultados. La principal limitante del equipo utilizado en la determinación de las DTG de los sprays, es el carácter espacial de la medición en lugar

de una medición puntual ya que la zona de medición es el cilindro formado por el haz láser a lo largo de la dirección transversal del spray. En segundo lugar, la necesidad de medir en una región alejada de la descarga de la boquilla para evitar un spray denso, lo que definió la posición para efectuar las mediciones 110 mm aguas abajo de la descarga. Al ser un instrumento óptico de medición, la confiabilidad de las mediciones depende del tamaño de la muestra, con la incertidumbre disminuyendo con el tamaño de ésta. En este caso, por limitaciones con la cantidad de emulsión disponible, el tamaño de muestra para cada medición fue definido con  $N_T = 1000$ , lo que da como resultado una incertidumbre en las mediciones del 3.16%. La incertidumbre del resto de los parámetros medidos dependió de los equipos utilizados, siendo las mediciones más críticas las del gasto de aceite y emulsión ya que se recurrió al aforo, con un error estimado en  $\pm 8\%$ . Las mediciones de flujo de aire estuvieron supeditadas a la exactitud del flujómetro, con un  $\pm 1\%$  de la escala completa. Los resultados obtenidos a partir de las mediciones de ángulo y longitud a partir de las fotografías podrían tener un error de  $\pm 0.5^\circ$  para el caso de los ángulos y de  $\pm 5\%$  en las mediciones lineales. Una vez obtenidos los resultados, en todos los casos se efectuaron regresiones polinomiales u otras que fueran más apropiadas y en lo general, se obtuvieron coeficientes de correlación muy por encima del 90%, lo que garantiza que las tendencias encontradas son confiables. La medición de las presiones en el tanque y en la línea del aire secundario está ligada al regulador de presión lo que la mantenía muy estable durante el tiempo de las mediciones, sin embargo, se tenía que monitorear continuamente la del tanque porque dependía de la cantidad de emulsión o aceite dentro del mismo, estimándose una incertidumbre de  $\pm 0.5\%$ . Estos números son los que llevaron a la decisión de tomar como variable independiente para todo el estudio la relación de presiones. El uso de este parámetro presenta cierta incomodidad ya que el gasto aumenta cuando la  $r_p$  disminuye lo que en general, las gráficas debieran leerse de derecha a izquierda, pero esto no altera de ninguna manera el comportamiento, por lo que decidió dejarlas tal y como se definió  $r_p$ . La variable más controvertida de este estudio viene siendo la velocidad del spray, obtenida a partir de una suposición básica y que se refleja directamente en los valores de  $Re$ , sin embargo, los valores medidos en el trabajo con PDA, dan resultados congruentes con lo aquí supuesto.

Debe aclararse que en este trabajo el objetivo fue el de conocer el comportamiento de la emulsión y no los aspectos técnicos de la boquilla de atomización utilizada.

Para cerrar este capítulo y retomar los resultados en el siguiente, se puede concluir anticipadamente que la emulsión si produce cambios sustanciales en la morfología del spray y que ésta puede ser destruida parcial o totalmente bajo ciertas condiciones de operación.

## Capítulo 6. Conclusiones.

El trabajo de investigación llevado a cabo y presentado en esta tesis, se dividió en 6 capítulos, de los cuales, los 4 intermedios, correspondieron a 5 fases del proyecto: análisis de sprays, en el capítulo 2; diseño de mezcladores para producción de emulsiones, en el capítulo 3; reología de emulsiones, en el capítulo 4; y finalmente, producción de emulsión modelo y análisis de sprays de emulsiones, en el capítulo 5.

En el capítulo 2 se abordó el estudio de un spray utilizando la técnica de anemometría de fase doppler (PDA) la cual se había identificado como la técnica a utilizar en la fase final y más relevante, en cuanto a objetivos del proyecto, sin embargo, este equipo sufrió desperfectos que obligaron a utilizar otra técnica. De cualquier forma, el estudio del spray tenía como objetivo principal, obtener información que formara parte de la base de datos contra los cuales contrastar los resultados de la fase principal, esto es, comparar ese comportamiento contra el obtenido en una emulsión. Se definieron algunas de las características generales que se utilizarían en el resto del proyecto, particularmente, las condiciones de operación de referencia, y sobre todo, el uso de una boquilla comercial de atomización asistida con aire. Con ese equipo se obtuvo el campo de velocidades en dirección axial, el campo de velocidades “tangencial” y el tamaño de gota en cada punto de medición, incluido el  $D_{32}$ , cubriéndose un amplio rango en el espacio, desde distancias muy cercanas a la boquilla, donde los resultados contaron con muestras válidas mucho más reducidas que las obtenidas aguas más abajo, como resultado de la elevada densidad que tiene el spray en esa zona cercana a la boquilla. Se produjeron mapas muy completos de los campos de velocidad axial, “tangencial”, y de los valores RMS en ambas direcciones, cubriendo hasta una distancia de 110 mm aguas debajo de la boquilla de atomización. Del análisis efectuado sobre los parámetros del spray se concluyó que éste estaba desarrollado, es decir, no había cortinas o ligamentos que se pueden producir con una boquilla. Los valores de  $D_{32}$  y ángulo de spray fueron utilizados en el análisis de la fase 5. El análisis del campo de velocidades “tangencial” sugería la presencia de un par de vórtices en el plano transversal del spray, por lo que se decidió complementar el estudio anterior utilizando otra técnica; entonces se diseñó un experimento con velocimetría de imágenes de partículas, PIV-2D, ya que ésta permite conocer el comportamiento del campo de velocidades en un plano completo. Se efectuó un estudio del spray, utilizando exclusivamente aire como sustancia de trabajo y el papel de las gotas reemplazado por las partículas producidas por un generador de humo, manteniéndose en este caso, el número de Reynolds, al menos un valor muy cercano al de los experimentos con PDA. Este estudio fue limitado principalmente por el mismo equipo ya que a pesar de poderse obtener campos complejos, los valores promedio dependen de la cantidad y rapidez de imágenes obtenidas, y del tamaño de celdas definidas para obtener las velocidades, lo que impide conocer escalas más pequeñas. Los resultados en la dirección longitudinal fueron concordantes con los obtenidos previamente con PDA mientras que los resultados obtenidos para secciones transversales, para distancias desde  $L/d_0 = 17.4$  a  $60.9$ , muestran que aunque hay un flujo con más de un remolino para el movimiento promedio en las cercanías de la descarga de la boquilla, aguas abajo el movimiento vorticoso parece desvanecerse o más precisamente, parece estar pobremente promediado a causa del relativamente reducido número de 390 pares de imágenes utilizado. Por otra parte, los pares de imágenes para tales regiones muestran un patrón de flujo vorticoso muy complejo, cambiando desde más de 2 ó 3 vórtices a 6 ó 7 en la zona interna del spray. Con el fin de mejorar los resultados obtenidos con PIV-2D, se modificó la instalación para ampliar el análisis mediante PIV-3D. Se pudo percibir que para la boquilla utilizada, existe un claro achatamiento en la forma del perfil de velocidades axial

que ya aparecía en el campo medido con PDA en una zona muy cercana a la descarga de la boquilla; esa forma se amplifica aguas abajo donde el perfil tiene una forma más bien elíptica, sin embargo, solo se percibió claramente cuando se utilizó la técnica de PIV-3D. Es evidente que con relación al interés principal de este trabajo, se pudo obtener más detalle del campo de flujo. La boquilla utilizada produce en principio una cantidad definida de filamentos vorticosos que se desarrolla aguas abajo pero que están fluctuando de manera intermitente, por lo que solamente se pueden ver cuando coinciden con el disparo de la cámara CCD. Cuando se utilizó la técnica de PIV-3D, incrementando al doble el número de pares de imágenes, los resultados no fueron muy distintos a los previamente obtenidos, lo que podría indicar entonces que así es el flujo, o que son necesarias aún más pares de imágenes; esta pregunta quedó sin respuesta. La información obtenida utilizando combinadamente las técnicas de PDA, y PIV en 2D y 3D, da una imagen general de un spray, tanto en la distribución espacial de los tamaños de gotas involucrados, como de las características de sus campos de velocidad axial y transversal. Los resultados de esta fase se reportaron en sendos trabajos [5R, 8C, 11C].

En la fase 2, abordada en el capítulo 3, se planteó el siguiente problema: La producción de una emulsión aceite-en-agua [OW] que tuviese las características apropiadas para usarse en la fase 5. Su fabricación y características dependen de las cantidades de agua, aceite y tensoactivo utilizadas, la temperatura, y de manera muy significativa, del mezclado que debe llevarse a cabo, ya que la emulsión se produce por el cortante aportado por el dispositivo mezclador. Cuando se fabrica una emulsión para verificar sus propiedades en laboratorio, es suficiente contar con un pequeño depósito y un dispositivo mezclador, por lo que combinando los parámetros anteriores se puede obtener la emulsión deseada, sin embargo, cuando se desean producir cantidades más elevadas, el cambio de escala puede conducir a la necesidad de contar con más de un mezclador en tándem que lleve a cabo la tarea. Con el objetivo de conocer con detalle la zona de mezclado entre rotores, se diseñó y construyó un modelo para visualizar y aplicar velocimetría de imágenes de partículas (PIV) en dos dimensiones. Los resultados de la visualización, medición y análisis para un rango de  $H/D$  de 1 a 2, y un intervalo de números de Reynolds entre 250 y 1200, permitieron identificar las mejores condiciones para el mezclado, mismas que se utilizaron en la fase 4. Un resultado adicional obtenido en este estudio, fue la solución para obtener partículas para lograr la medición con PIV en las condiciones del arreglo experimental. Los resultados detallados de esta fase sirvieron para generar un informe interno para el Laboratorio de Sistemas de Combustión, y para un trabajo presentado en un congreso internacional, [11, 6C]

En la fase 3 presentada en el capítulo 4, se inició el estudio detallado de las emulsiones, cubriendo desde la fabricación de una emulsión, su caracterización, modificación de condiciones para ver el efecto de los parámetros, esto es, cantidades de constituyentes, temperatura, tiempo, rpm en el mezclador, todo con el fin de conocer el comportamiento de emulsiones O/W para seleccionar una que resultara apropiada para su uso en experimentos de atomización. Se generaron y analizaron diversas emulsiones teniendo en cuenta el criterio siguiente: la emulsión a elegir debería tener una viscosidad aparente igual a la de un aceite previamente utilizado en una boquilla de atomización cuyos resultados servirán para comparar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento del spray de emulsión; entonces, se requería identificar su composición y su comportamiento como función de la temperatura. Complementando la información anterior con el objetivo de contar con un visión más general del comportamiento de las emulsiones O/W, se buscó determinar además del efecto de la temperatura, el efecto que tienen sobre las características reológicas las características físicas de la emulsión, es decir, su distribución de tamaños de gotas y su composición agua/aceite. Los resultados muestran

que las emulsiones O/W con alta densidad de la fase dispersa se comportan como fluidos pseudoplásticos, este comportamiento prevalece en un amplio rango para emulsiones diluidas y existe un valor de contenido de agua arriba del cual, el comportamiento se vuelve newtoniano. La viscosidad de la emulsión, como función de la cantidad de agua manteniendo constante la distribución de tamaños de gotas de la fase dispersa, decae exponencialmente de la forma  $\eta = 1591.2e^{-0.0961W}$ . Por otra parte, cuando se mantiene constante la composición y se modifican las curvas de distribución de tamaños de gotas, variándose en consecuencia sus tamaños característicos, se encontró una correlación de la forma  $\eta = 0.9604D^{*-0.7385}$  que representa de forma adecuada los datos obtenidos. A diferencia del decaimiento exponencial de la viscosidad con la temperatura de las emulsiones con alta concentración de la fase dispersa, cuando ésta se encuentra en niveles cercanos al comportamiento newtoniano, su decaimiento es del orden  $\sim T^2$ .

Los resultados detallados de esta fase sirvieron para generar un informe interno para el Laboratorio de Sistemas de Combustión, y para un trabajo presentado en un congreso [2I, 8C].

En las fases 4 y 5 presentadas en el capítulo 5, se desarrollaron las siguientes actividades: producción de la emulsión y su caracterización reológica para comprobar y/o ajustar las características predefinidas, caracterización de sprays, el de referencia con aceite convencional y el de emulsión, y el análisis de la emulsión después del paso por la boquilla de atomización. Como se recordará, todo este proyecto se sustentó sobre las siguientes preguntas: ¿la emulsión produce efectos sobre un spray en cuanto a forma y DTG en contraste con uno de aceite de características semejantes?, y particularmente, ¿la emulsión sufre cambios o incluso se destruye cuando pasa por la boquilla de atomización? Estas son las principales respuestas de este trabajo.

- Emulsión. La producción de la emulsión se obtuvo a partir de los resultados en las fases 2 y 3 y resultó muy satisfactoria, lo que confirma los resultados de esas fases. Solo se debe agregar que la emulsión utilizada para los experimentos fue una emulsión diluida que, como se concluye en el capítulo 4, tiene un comportamiento newtoniano, por lo que queda como incógnita el saber qué ocurriría si se utilizara una emulsión densa -lo podría ser una línea a seguir-utilizando lo ya desarrollado y simplemente, ajustar la viscosidad con temperatura en lugar de agua para diluirla.
- Distribución espacial. Aún cuando los resultados cualitativos son iguales, cuando se observan con más detalle, se puede encontrar una clara diferencia entre ambos sprays, el resultado neto es que el de emulsión se abre más que el convencional lo que implica un comportamiento equivalente al convencional sea a una mayor  $r_p$  o una menor temperatura, es decir, una condición más desfavorable.
- Tamaños de gotas. El análisis de DTG confirma que los tamaños en un gran rango son mayores y ocupan mayor espacio que lo del spray de referencia, el gráfico de  $D_{32}$  confirma esta tendencia general.
- Comportamiento con  $r_p$ . Nuevamente, como en la distribución espacial, se encontró un comportamiento cualitativo igual, por lo que recurriendo a los detalles, se cuantificaron diferencias significativas: en cuanto a  $D_{32}$  para valores cercanos a  $r_p = 1.0$ , los valores  $D_{32}$  son prácticamente iguales, incrementándose cuadráticamente con una diferencia de 40% para  $r_p \sim 1.50$ , a favor de la emulsión.
- Morfología del spray. Como resultado natural si se liga con los anteriores, el ángulo del spray de emulsión es más grande en lo general que el del spray de referencia. El ángulo varía cuadráticamente con  $r_p$ , con un valor máximo 40% mayor para el de emulsión cuando  $r_p \sim 1.22$ .

- Efecto de la emulsión sobre el spray. Como se ha enlistado, la emulsión produce cambios cuantificables sobre el spray, y al mismo tiempo, éste produce cambios sobre la emulsión. De los análisis realizados sobre ésta después del paso por la boquilla, se observó que en un rango la emulsión sufre cambios marginales casi nulos en el extremo, esto es en el rango  $\sim 1.22 < r_p = 1.50$ , pero a partir de ese valor, se produce un cambio en la DTG de la emulsión, desplazándose los gráficos hacia la izquierda, esto es, se pierden tamaños de gota grandes sucesivamente. Con el fin de ver si estos cambios producen algún efecto sobre la DTG del spray, no se ve que exista un efecto cuantificable sobre éste, sin embargo, sí se observó que en la DTG de la emulsión se “producen” gotas de tamaño más pequeño sucesivamente con la disminución de  $r_p$ . Como esto es improbable, se puede concluir que se debe a la separación de gotas más grandes producidas por el efecto de floculación. Como comentario al margen, las emulsiones que se analizaron después de estar un tiempo significativo en reposo, muestran el mismo efecto, es decir la aparición de gotas más pequeñas que no estaban en su estado original, esto confirma la aseveración anterior.
- Destrucción. Siendo una de las preguntas más relevantes de este trabajo, queda al final, pero eso no le resta importancia. Las observaciones y las evidencias muestran que efectivamente existe destrucción de la emulsión, sin embargo, es mínima en un rango amplio de  $r_p$ , y a partir de un valor crítico de  $r_p \sim 1.22$ , la destrucción crece muy rápido para valores más reducidos, observándose que pudiera existir destrucción total de la emulsión antes de llegar a  $r_p = 1.0$ . Las 2 emulsiones utilizadas mostraron diferencias importantes en cuanto a la cantidad de emulsión destruida, más no así del inicio de la destrucción, es decir en ambos casos el valor crítico fue de  $r_p \sim 1.22$ . Retomando las gráficas producidas y los DTG en función de  $r_p$ , se observa que los porcentajes mínimos del total de tamaños de gotas corresponden a ese valor.

Los resultados más relevantes de este trabajo se utilizaron para generar un trabajo para una revista internacional [10R].

### **Aportaciones**

Como corolario a este trabajo, se pueden enlistar las siguientes: se logró establecer el efecto que tiene la emulsión sobre las características del spray y el que éste a su vez, produce en la emulsión, notándose que hay una diferencia significativa entre éstos y los sprays convencionales de aceite: los sprays de emulsión tienen un ángulo más grande,  $D_{32}$  más grandes y una dispersión más suave; el efecto del spray sobre la emulsión es poco notable en un amplio rango, y después de un valor crítico, hay un desfaseamiento de los tamaños de gotas, perdiéndose las gotas más grandes, llegándose a la separación total de fases; entonces se puede afirmar que se respondieron las preguntas generadas en el planteamiento del proyecto. En el camino de conocer estas respuestas, se obtuvieron desde una solución para lograr partículas para la medición con PIV (fase 1), la identificación de las condiciones óptimas para el mezclado (fase 2), como el conocimiento detallado del comportamiento de las emulsiones, al menos una porción de las mismas (fase 3). Se generaron un total de 11 trabajos, entre informes (2), trabajos para congresos y workshops (7), y revistas arbitradas (2).

## Referencias

- [1] ASTM, E798-87 Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis, ASTM Standards on Liquid Particles and Sprays, ASTM, 1992.
- [2] Wu PK, Miranda RF, Faeth GM, Effects of Initial Flow Conditions on Primary Breakup of Non-Turbulent and Turbulent Round Jets, *Atomization and Sprays*, 1995, pp 175-196.
- [3] González U, Choque de Pared del Chorro Diesel de Inyección Directa, Univ. Politécnica de Valencia, 1998.
- [4] Mun RP, Young BW, Boger DV, Atomisation of dilute polymer solutions in agricultural spray nozzles, *Journal Of Non-Newtonian Fluid Mechanics* Vol. 83 (1-2) pp. 163-178, Jun 1999.
- [5] Palero V, Ikeda Y, Nakajima T, Shaka J, Comparison of PIV and SPIV in Application to Industrial Spray Burner 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics 2000 [n3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxaser2000/pdf/02\\_4.pdf](http://n3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxaser2000/pdf/02_4.pdf).
- [6] Sellens RW, Wang G, Advances in Optical Patterning for Sprays, With Applications, Eighth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena, CA, USA, July 2000.
- [7] Golovanevsky B & Levy Y, Fluid Image Velocimetry of the Flow in the Recirculation Zone of a Bluff Body Stabilized and Controlled Burner, 10th international symposium App. Of Laser Technniques to Fluid Mechanics, [n3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxaser2000/pdf/36\\_5.pdf](http://n3.dem.ist.utl.pt/downloads/lxaser2000/pdf/36_5.pdf).
- [8] McLean JA, Minnich MG, Montaser A, Su J, and Lai W, Optical Patterning: A Technique for Three-Dimensional Aerosol Diagnostics, *Anal. Chem.*, 2000, 72 (20), pp 4796–4804.
- [9] Porcheron E, Prevost L, Carreau JL, Roger F, Coaxial Atomization: Influence Of The Gas Jet Density On The Liquid Core Characteristics, ILASS-EUROPE 2000 Darmstadt 11-13 September 2000.
- [10] Greenhalgh DA, Laser Imaging of Fuel Injection Systems and Combustors, Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Vol. 214, Number 4, 2000, pp. 367-376(10).
- [11] Pikkula BM, Torres JH, Tunnell JW, and Anvari B, Cryogen Spray Cooling: Effects of Droplet Size and Spray Density on Heat Removal Lasers in Surgery and Medicine 28:103-112 (2001).
- [12] Pastor JV, López JJ, J. Juliá JE, Planar Laser-Induced Fluorescence fuel concentration measurements in isothermal Diesel sprays, *Optics Express* 310 Vol. 10, No. 7 / 2002.
- [13] Timm EJ, Stuecken TR and Schock HJ, Measurement and Visualization of Spray Characteristics of a Fuel Injector under Different Operating Temperatures and Pressures [www.egr.msu.edu/](http://www.egr.msu.edu/), 2002.
- [14] Stelter M, Brenn G, Durst F, The influence of viscoelastic fluid properties on spray formation from flat-fan and pressure-swirl atomizers, *Atomization And Sprays* Vol. 12 (1-3) pp. 299-327, 2002.
- [15] Kim B, Lee K, Lee C, Analysis of an Atomization Mechanism for an Air-Shrouded Injector, *Measurement Science and Technology*, Vol. 13(1), 2002, pp. 65-77(13).
- [16] Sallam KA, Dai Z, Faeth GM, Liquid Breakup at the Surface of Turbulent Round Liquid Jets in Still Gases, *International Journal of Multiphase Flow* 28 (2002) pp. 427-449.



- [17] Serpengüzel A., Küçükkenel S, Chang RK, Microdroplet Identification and Size Measurement in Sprays with Lasing Images, *Optics Express*, Vol 10, No. 20, 2002, pp 1118-1132.
- [18] Ho S-P, Water Spray Suppression and Intensification of High Flash Point Hydrocarbon Pool Fires, Worcester Polytechnic Institute, Phd Thesis, 2003, Ho 2003
- [19] Varga CM, Lasheras JC, Hopfinger EJ, Initial breakup of a small-diameter liquid jet by a high-speed gas stream *Journal of Fluid Mechanics* (2003), 497:405-434 Cambridge University Press.
- [20] Seneschal J, Ducottet C, Schon JP, Champoussin JC, Gucher P, Automatic System for Visualization and Characterization of High Pressure Diesel Sprays, *Proceedings of PSFVIP-4, France. F4073, 2003.*
- [21] Takei M, Weber R, Niioka T, Mathematical Modeling Of Industrial Furnaces Considering Detailed Oil Spray Characteristics, *Combustion Science And Technology*, Volume 175, Number 7, July 2003, pp. 1237-1262(26).
- [22] Yang JT, Chen AC, Yang SH, Huang J, Flow Analysis of Spray Patterns of Pressure-Swirl Micro Atomizers, *Proceedings of PSFVIP-4, France. F4052, 2003.*
- [23] Beck JC, Watkins AP, The Simulation of Fuel Sprays Using the Moments of the Drop Number Size Distribution, *International Journal of Engine Research*, Vol. 5(1), March 2004, pp. 1-21.
- [24] Jin SH, Brear MJ, Zakis G, Watson HC, Zavier C, Transient Behavior of the Fuel Spray From an Air-Assisted, Direct Fuel Injector, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2004.
- [25] Eckstein J, Freitag E, Hirsch C, Sattelmayer T, von der Bank R, Schilling T, Forced Low-Frequency Spray Characteristics of a Generic Airblast Swirl Diffusion Burner, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* -April 2005- Volume 127, Issue 2, pp. 301-306.
- [26] Loth E, *Simulating Dynamics of Dispersed Multi-Phase Flow*, Cambridge U. Press (draft), 2005.
- [27] Park K, The Flame Behavior of Liquefied Petroleum Gas Spray Impinging on a Flat Plate in a Constant Volume Combustion Chamber, *Proceedings of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering*, Number D5, 2005, pp. 655-663(9).
- [28] Kapulla R, Bravo S, Operation conditions of a phase Doppler anemometer: droplet size measurements with laser beam power, photomultiplier voltage, signal gain and signal-to-noise ratio as parameters, *Meas. Sci. Technol.* 17 221-227, 2006 doi:10.1088/0957-0233/17/1/034.
- [29] Park SW, Kim S, Lee CS, Breakup and atomization characteristics of mono-dispersed diesel droplets in a cross-flow air stream, *International Journal of Multiphase Flow* Volume 32, Issue 7, July 2006, Pages 807-822.
- [30] Tao R, Electric-Field Assisted Fuel Atomization, Department of Physics, Temple University, Philadelphia, PA 19122, USA, 2006 -<http://www.rexresearch.com/tao/tao.htm>.
- [31] Xiao H, Zhang Y, Experimental and Numerical Study on the Characteristics of Liquid Phase LPG and Diesel Fuel Sprays, SAE Paper 2006-32-0076, 2006.
- [32] Golovitchev VI, Corcione FE, Spray Combustion Modeling, Chalmers University of Tech. (Draft) <http://www.tfd.chalmers.se/~valeri/Book.html>, 2006.
- [33] Thompson JC, Rothstein JP, The atomization of viscoelastic fluids in flat-fan and hollow-cone spray nozzles, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 147 (2007) 11–22.

- [34] Bach E, Leuteritz U, Sprays (atomisation of liquids) High voltage improves diesel atomization, <http://www.fif.mw.htw-dresden.de> Dantec(<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=526>), sep 2007.
- [35] Suh HK, Park SW, Lee CS, Effect of piezo-driven injection system on the macroscopic and microscopic atomization characteristics of diesel fuel spray, *Fuel* Vol. 86(17-18), Dec. 2007, pp. 2833-2845.
- [36] Aliseda A, Hopfinger EJ, Lasheras JC, Kremer DM, Berchielli A, Connolly EK, Atomization of viscous and non-newtonian liquids by a coaxial, high-speed gas jet. Experiments and droplet size modeling, *International Journal of Multiphase Flow* 34 (2008) 161–175.
- [37] Risberg M, Spray visualisations of gas-assisted atomisation of Black Liquor, Msc thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2008.
- [38] Hung LS, Harrington DL, Gandhi AH, Markle LE, Parrish SE, Shakal JS, Sayar H, Cummings SD, Kramer JL, Gasoline Fuel Injector Spray Measurement and Characterization – A New SAE J2715 Recommended Practice SAE Technical Paper Series 2008-01-1068, SAE International 2008 World Congress Detroit, Michigan April 14-17, 2008.
- [39] Suh H, Lee CS, Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29(4), Aug. 2008, pp. 1001-1009.
- [40] Tao R, Huang K, Tang H, Bell D, Electrorheology Improves Engine Efficiency, 11th Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions *Journal of Physics: Conference Series* 149 (2009) 012030.
- [41] Park SH, Kim HJ, Suh HK, Lee CS, A study on the fuel injection and atomization characteristics of soybean oil methyl ester (SME), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, ISSN: 0142727x, Vol. 30(1) Feb. 2009, pp. 108-116.
- [42] Park SH, Kim HJ, Suh HK, Lee CS, Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30(6) Dec. 2009, pp. 1183-1192.
- [43] Hardalupas Y, Sahu S, Taylor AMKP, Zarogoulidis K, Simultaneous planar measurement of droplet velocity and size with gas phase velocities in a spray by combined ILIDS and PIV techniques, *Experiments In Fluids* Vol. 49(2) pp. 417-434, Aug 2010.
- [44] Labergue A, Depredurand V, Delconte A, Castanet G, Lemoine F, New insight into two-color LIF thermometry applied to temperature measurements of droplets, *Experiments In Fluids* Vol. 49(2) pp. 547-556, Aug 2010.
- [45] Muliadi AR, Sojka PE, Sivathanu YR, Lim J, A Comparison of Phase Doppler Analyzer (Dual-PDA) and Optical Patternator Data for Twin-Fluid and Pressure-Swirl Atomizer Sprays, *Journal Of Fluids Engineering-Transactions Of The ASME* Vol.132(6), 6 Jun 2010.
- [46] Rigopoulos S, Population balance modelling of polydispersed particles in reactive flows, *Progress In Energy And Combustion Science* Vol. 36(4) pp. 412-443, Aug 2010.
- [47] Sivathanu YR, Lim J, Wallace B, Seei R, A Comparison Of Spray Angle Measurements Using Optical And Mechanical Methods, *Atomization And Sprays* Vol. 20(1) pp. 85-92, 2010.
- [48] Desjardins O, Pitsch H, Detailed Numerical Investigation Of Turbulent Atomization Of Liquid Jets, *Atomization And Sprays* Vol. 20(4) pp. 311-336, 2010.

- [49] Ejim CE, Rahman MA, Amirfazli A, Fleck BA, Effects of liquid viscosity and surface tension on atomization in two-phase, gas/liquid fluid coker nozzles, *Fuel* Vol. 89(8) pp. 1872-1882, Aug 2010.
- [50] Merklinger HM, The Scheimpflug Principle-Part I, *Shutterbug*, November 1992.
- [51] Schabacker J, Bölcs A, Investigation of turbulent flow by means of the PIV method, 13th Symposium on Measuring Techniques for Transonic and Supersonic Flows in Cascades and Turbomachines, Zurich, Switzerland, 5–6 September 1996.
- [52] Usera G, Adaptive Algorithms For Piv Image Analyzing, Grupo De Trabajo Sobre Hidromecánica 5ª Reunión 11 a 14 de mayo 1999, Montevideo, Uruguay.
- [53] Lindken R, Merzkirch W, A novel PIV technique for measurements in multi-phase flows and its application to two-phase bubbly flows, 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry Göttingen, Germany, September 17-19, 2001 PIV'01 Paper A231.
- [54] Day SW, McDaniel JC, Wood HG, Allaire PE, Landrot N, Curtas A, Particle Image Velocimetry Measurements of Blood Velocity in a continuous flow ventricular assist device *ASAIO Journal*, 2001, 47:406-411, Day et al. 2001
- [55] Pittaluga F, Traverso S, Time-Dependent Numerical Prediction of the Fuel Premixing Process Within an Aero-Propulsion Combustion System, 24th Event of the Italian Section of the Combustion Institute, S. Margherita Lig., Sept. 2001.
- [56] Uzol O, Chow Y-C, Katz J, Meneveau C, Unobstructed particle image velocimetry measurements within an axial turbo-pump using liquid and blades with matched refractive indices, *Experiments in Fluids* 33 (2002).
- [57] Day SW, McDaniel JC, Wood HG, Allaire PE, Song X, Lemire PP, Miles SD, A prototype heartquest ventricular assist device for Particle Image Velocimetry Measurements, *Artificial Organs*, Vol. 26(11), 2002. pp. 1002-1005.
- [58] Abdulmouti H, The Flow Patterns in Two Immiscible Stratified Liquids Induced by Bubble Plume, *International Journal of Fluid Dynamics* (2002) Vol 6, Article 1, 1–15.
- [59] Day SW, McDaniel JC, Lemire PP, Wood HG, Measurements Of Mean Velocity And Turbulent Statistics In A Centrifugal Blood Pump BED-Vol. 53, 2002 *Advances in Bioengineering ASME* 2002.
- [60] Palero JV, Ikeda Y, 3D Structures of Evaporating Fuel Droplets by means Stereoscopic PIV, *Journal of Visualization*, 2002.
- [61] Lacoste L., Kennaird D, Begg S, Heikal MR, Phase Doppler Anemometry Measurements of a Diesel Spray, [www.sussex.ac.uk/automotive/tvt2002/](http://www.sussex.ac.uk/automotive/tvt2002/), 2002.
- [62] Hassan YA, Dancing Bubbles in Turbulent Flows: PIV Measurements and Analysis, *ASME Fluids engineering*, 2003 p8-comunicacion, <http://files.asme.org/Divisions/FED/16289.pdf>.
- [63] Davis JM, Disimile PJ, The Effect of Optical Configuration Selection on Phase Doppler Anemometer Fire Suppressant Nozzle Characterizations, Halon Options Technical Working Conference, 14th. Proceedings. HOTWC 2004.
- [64] Day SW, McDaniel JC, PIV Measurements of Flow in a Centrifugal Blood Pump: Steady Flow, *ASME Transactions of the ASME Journal of Biomechanical Engineering* Vol. 127, April 2005, pp 244-253.
- [65] Day SW y McDaniel JC, PIV Measurements of Flow in a Centrifugal Blood Pump: Time-Varying Flow, *ASME Transactions of the ASME Journal of Biomechanical Engineering* Vol. 127, April 2005, pp 254-263.

- [66] Nishino K and Choi J-W, Index-Matching PIV for Complex Flow Geometry, 4th Japan-Korea Joint Seminar on Particle Image Velocimetry Sept. 29-Oct.1, 2006, Kobe, Japan.
- [67] DeLapp CJ, Reeder MF, Crafton J, Goss LP, Clean Seeding Material for Particle Image Velocimetry Measurements, 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 5-8 June 2006, AIAA-2006-2807, 2006.
- [68] Miessner U, Coyajee E, Slot H, Lindken R, PIV measurement of an oil droplet colliding with an oil-water interface, 13th Int. Symp on Appl. Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, June 26 – 29, 2006.
- [69] Perry RH, D. Green, Mixing efficiency in a stirred tank cap. 11 Perry's Chemical Engineers' Handbook, 1984.
- [70] Bakker A, Hydrodynamics of stirred gas-liquid dispersions, PhD thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, 1992.
- [71] Bakker A., Fasano JB, Time Dependent, Turbulent Mixing and Chemical Reaction in Stirred Tanks, Annual AIChE Meeting, November 1993, St. Louis, Missouri. AIChE Symposium Series 299, Volume 90, 1993, pp 71-78.
- [72] Bakker A, Gates LE, Viscous Mixing Chemical Engineering Progress, dec. 1995, pp 24-34.
- [75] Holland FA, Bragg R, Fluid Flow for Chemical Engineers, Mixing of liquids in tanks, cap.5, Edward Arnold pp 164-188, 1995.
- [74] Myers KJ, Ward RW, Bakker A, A digital Particle Image Velocimetry Investigation of Flow Field Instabilities of Axial-Flow Impellers, Journal of Fluids Engineering 119, No. 3, pp623-632 (1997).
- [75] Bakker A, Oshinowo LM, and Marshall EM, The Use of Large Eddy Simulation to Study Stirred Vessel Hydrodynamics, 10th European Conference on Mixing July 2-5, 2000, Delft, the Netherlands.
- [76] Bartels C, Breuer M, Durst F, Comparison between direct numerical simulation and k-e prediction of the flow in a vessel stirred by a Rushton turbine. Proceedings of the 10th European Conference on Mixing, Delft, The Netherlands (pp. 239–243), 2000.
- [77] Bartels C, Breuer M, Durst F, Simulation of the flow around a Rushton turbine, Research Projects on the High Performance Computers 1997 – 1999 Leibniz Computing Center, LRZ, 2000.
- [78] Oshinowo L, Bakker A, Marshall E, Virtual Mixing. Simulating mixing impellers using computational fluid dynamics, Flow Control The magazine of fluid handling systems july 2001, Vol. VII, No. 7, pp28-33 [www.flowcontrolnetwork.com](http://www.flowcontrolnetwork.com).
- [79] Bakker A, Haidari A, Marshall EM, Modeling Stirred Vessel Hydrodynamics Using Large Eddy Simulation. Mixing XVIII Pocono Manor, Pennsylvania, USA, June 2001.
- [80] Bartels C, Breuer M, Wechsler K, Durst F, Computational fluid dynamics applications on parallel-vector computers: computations of stirred vessel flows, Computers and Fluids, Vol. 31(1), Jan. 2002, pp. 69-97(29).
- [81] Oshinowo LM, Bakker A, CFD Modeling Of Solids Suspensions In Stirred Tanks, Symposium on Computational Modeling of Metals, Minerals and Materials, TMS Annual Meeting, February 17-21, 2002, Seattle, WA.
- [82] Harvey A, Mackley MR, Reis N, Teixeira JA, Vicente AA, Fluid mixing and particle suspension in a novel microreactor, Proceedings of 30th Conference SSCHE, SK, 2003.

- [83] Aubin J, Le Sauze N, Bertrand J, Fletcher DF and Xuere C, PIV measurements of flow in an aerated tank stirred by a down- and an up-pumping axial flow impeller. *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 28(5), April 2004, Pages 447-456.
- [84] Montante G, Bakker A, Stirring Up the Phases in Tall Tanks, *Fluent Newsletter*, pp. 8-9, Fall 2004.
- [85] Montante G y Magelli F, Modelling of solids distribution in stirred tanks: analysis of simulation strategies and comparison with experimental data, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol.19(3), March, 2005, pp. 253-262(10).
- [86] Portela L, Oliemans R, Possibilities and Limitations of Computer Simulations of Industrial Turbulent Dispersed Multiphase Flows, *Applied Scientific Research*, Volume 77, Numbers 1-4, November 2006, pp. 381-403(23).
- [87] Martínez D, Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT: caso de una turbina Rushton, Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, nov 2006.
- [88] Montante G, Bakker A, Paglianti A and Magelli F, Effect of the shaft eccentricity on the hydrodynamics of unbaffled stirred tanks, *Chemical Engineering Science* Vol. 61(9), May 2006, pp. 2807-2814.
- [89] Fan J, Wang Y, Fei W, Large eddy simulations of flow instabilities in a stirred tank generated by a Rushton turbine, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15: 200–208, 2007.
- [90] Fan L, Mao Z-S, Yang C, Wang Y, Numerical Simulation Of Laminar Solid-Liquid Two-Phase Flow In Stirred Tanks, *Chemical Engineering Communications*, Volume 194, Number 3, March 2007, pp. 291-308(18).
- [91] Pacek A, Baker M, Utomo AT, Characterisation of Flow Pattern in a Rotor Stator High Shear Mixer, *Proc. Of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6) Copenhagen*, 16-20 sept. 2007.
- [92] Yapici K, Karasozen B, Schäferd M, Uludaga Y, Numerical Investigation of the Effect of the Rushton Type Turbine Design Factors on Agitated Tank Flow Characteristics, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* Vol. 47(8), Aug. 2008, pp. 1340-1349.
- [93] Nurtono T, Setyawan H, Altway A, Winardi S, Macro-instability characteristic in agitated tank based on flow visualization experiment and large eddy simulation, *Chemical Engineering Research and Design* 87, 2009 pp. 923–942.
- [94] Griffin EL, The Constitution of Oil Emulsions, *Journal of Economic Entomology*, Vol. 16(5), Oct. 1923, pp. 430-432(3).
- [95] Pal R, Rheological Properties Of Emulsions Of Oil In Aqueous Non-Newtonian Polymeric Media, *Chemical Engineering Communications*, Volume 111(1), Jan. 1992, pp. 45-60.
- [96] Khan MR, Rheological Properties of Heavy Oils and Heavy Oil Emulsions, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 18(4), June 1996, pp. 385-391.
- [97] McLean JD, Kilpatrick PK, Effects of Asphaltene Solvency on Stability of Water-in-Crude-Oil Emulsions, *Journal Of Colloid And Interface Science* 189, 242–253 (1997).
- [98] Peker S, Kizildemir M, Rheological Properties Of High Internal Phase Ratio Emulsions, Volume 1 - *International Symposium on Liquid-Liquid Two Phase Flow and Transport Phenomena Antalya, Turkey*, November 3-7, 1997.

- [99] Salager J-L, Cuaderno FIRP S747-B Formulacion, composicion y Fabricacion de Emulsiones para obtener las propiedades deseadas. Estado del Arte Parte B. Propiedades de las Emulsiones y su Medicion, Merida, Venezuela: Universidad de los Andes, 1999.
- [100] Garza S, Caracterización reológica y microbiológica y cinéticas de deterioro en cremogenado de melocotón, tesis doctoral, Universidad de Lleida, 1999.
- [101] Becerra HQ, Retamoso C, Macdonald DD, The corrosion of carbon steel in oil-in-water emulsions under controlled hydrodynamic conditions, Corrosion Science Vol. 42(3), 1 March 2000, pp. 561-575.
- [102] Kawaguchi M, Tsujino T, Kato T, Interfacial and Rheological Properties of Oil-in-Water Emulsions Stabilized by Poly(oxyethylene) Alkyl Ethers, Langmuir, 16(13), pp. 5568-5572, 2000.
- [103] Pal R, Novel viscosity equations for emulsions of two immiscible liquids, Journal of Rheology - March 2001 -Volume 45, Issue 2, pp. 509-520.
- [104] Salager J-L, Briceño MI, Bracho CL, Heavy Hydrocarbon Emulsions. Making use of the State of the Art in Formulation Engineering, Encyclopedic Handbook of Emulsion Technology, Chapter 20 (pp 455-495) Johan Sjöblom Editor, Marcel Dekker New York 2001.
- [105] Montesi A, Peña A, Hirasaki G, Pasquali M, Viscoelastic Behavior Of Polymer-Thickened Water-In-oil Emulsions, Proc. 3rd World Congr. on Emulsions (2002).
- [106] Pal R, Novel shear modulus equations for concentrated emulsions of two immiscible elastic liquids with interfacial tension, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 105(1), 1 July 2002, pp. 21-33(13).
- [107] Peralta MV, Romo C, Extra heavy fuel oil in water emulsions for piping and combustion in power plants. American Flame Research Committee. 2002 Spring Meeting. 8 al 10 mayo de 2002. Ottawa, Canada.
- [108] FSI Energy Discussion of Water-in-Oil Emulsion Combustion. Petroferm's PEP-99™ Emulsion, <http://fsienergy.com/H20INOIL.htm>.
- [109] Mendonça CRB, Bica CID, Piatnicki CMS, Water in soybean oil micro emulsions as medium for electrochemical measurements, J. Braz. Chem. Soc. Vol.14(4), São Paulo July/Aug. 2003.
- [110] Jiao J, Burgess DJ, Rheology and Stability of Water-in-Oil-in-Water Multiple Emulsions Containing Span 83 and Tween 80. AAPS PharmSci. 2003; 5 (1): article 7. DOI: 10.1208/ps050107.
- [111] Palanuwech J, Coupland JN, Effect of surfactant type on the stability of oil-in-water emulsions to dispersed phase crystallization, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects Vol. 223, Issues 1-3, 21 August 2003, pp. 251-262.
- [112] Silvander M, Hellström A, Wärnheim T, Claesson P, Rheological properties of phospholipid-stabilized parenteral oil-in-water emulsions--effects of electrolyte concentration and presence of heparin, Int J Pharm. 2003 Feb 18;252(1-2):123-32.
- [113] Yaghi B, Rheology of oil-in-water emulsions containing fine particles, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 40(3), Dec. 2003, pp. 103-110(8).
- [114] Peckham J, Retail diesel emulsion may become common in Italy Diesel Fuel News, Feb 3, 2003.
- [115] Langevin D, Poteau S, Hénaut I, Argillier JF, Crude Oil Emulsion Properties and their Application to Heavy Oil Transportation, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 59 (2004), No. 5, pp. 511-521.

- [116] Lin C-Y, Wang K-H, Effects of an oxygenated additive on the emulsification characteristics of two- and three-phase diesel emulsions, *Fuel* Vol.83(4-5), March 2004, pp. 507-515.
- [117] Malkin AY, Masalova I, Slatter P and Wilson K, Effect of droplet size on the rheological properties of highly-concentrated w/o emulsions, *Rheologica Acta* Vol.43(6), dic 2004, pp 584-591.
- [118] Brennen CE, *Fundamentals of multiphase flow*, Cambridge University Press, 2005.
- [119] Chen Y, Fan W, Song Y, Nan G, Li S, Chen S, Effects of different heavy crude oil fractions on the stability of oil-in-water emulsions the film properties of heavy crude functional components and water system, *Petroleum Sci.* (2005), 1(2), 93-96.
- [120] Chen S, *Rheological Properties of Oil in Water Emulsions and Particulate Suspensions*, PhD Thesis. Norwegian University of Science and Technology NTNU, 2006.
- [121] Dan D, Jing G, Apparent viscosity prediction of non-Newtonian water-in-crude oil emulsions, *Journal of Petroleum Science and Engineering* Vol. 53(1-2), August 2006, pp. 113-122.
- [122] Dluzewska E, Stobiecka A, Maszewska M, Effect of Oil phase concentration on rheological properties and stability of beverage –emulsions, *Acta. Sci. Pol., Technol. Aliment.* 5(2) 2006, 147-156.
- [123] Lee SJ, Emulsion rheology and properties of polymerized high internal phase emulsions, *Korea-Australia Rheology Journal* Vol. 18(4), Dec. 2006, pp. 183-189.
- [124] Lorenzo G, Zaritzky N, Califano A, Caracterización Reológica de Emulsiones O/W de Contenido Lipídico Reducido, Estabilizadas Con Hidrocoloides, XXII Interamerican Confederation of Chemical Engineering-IACCHe (CIIQ)2006 /VCAIQ [http://www.aaiq.org.ar/formCongreso2006/info/ProgSubarea.php?id\\_subarea=43&idioma=ingles](http://www.aaiq.org.ar/formCongreso2006/info/ProgSubarea.php?id_subarea=43&idioma=ingles).
- [125] Rondón M, Bouriati P, Lachaise J, Breaking of Water-in-Crude Oil Emulsions. 1. Physicochemical Phenomenology of Demulsifier Action, *Energy Fuels*, 2006, 20 (4), pp. 1600–1604.
- [126] Zhernovoi A, A direct method of determining the water content in water-oil emulsions, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, Vol. 42(2), March 2006, pp. 142-143(2).
- [127] SINTEF, Rheology of waxy crude oils and their WO emulsions [http://129.241.253.164/upload/Materialer\\_kjemi/Marin%20milj%C3%B8teknologi/fakaark/rheology-web.pdf](http://129.241.253.164/upload/Materialer_kjemi/Marin%20milj%C3%B8teknologi/fakaark/rheology-web.pdf).
- [128] Tao R, Xu X, Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field, *Energy & Fuels* 2006, 20, 2046-2051.
- [129] Enriquez A, *Hidrodinámica de emulsiones en tubería*, Tesis profesional, Instituto Tecnológico de Veracruz, 2007.
- [130] Evdokimov I, Novikov M, Features of industrial water-crude oil emulsions. Microwave studies, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, Vol. 43(1), Jan. 2007, pp. 46-50(5).
- [131] Kulik N, Trapido M, Veressinina Y, Munter R, Treatment of Surfactant Stabilized Oil-In-Water Emulsions by Means of Chemical Oxidation and Coagulation, *Environmental Technology*, Vol. 28(2), Dec. 2007, pp. 1345-1355(11).
- [132] Lu RJ, Xu XR, Yang JY, Gao, JS, Reduction of the Total Acid Number of Crude Oil with Basic Solution, *Petroleum Science and Technology*, Vol. 25(11), Nov. 2007, pp. 1415-1427(13).

- [133] Márquez A, Palazolo G, Wagner J, Water in oil (w/o) and double (w/o/w) emulsions prepared with spans: microstructure, stability, and rheology, *Colloid and Polymer Science*, Vol. 285(10), July 2007, pp. 1119-1128(10).
- [134] Tan W, Yang X-G, Tan X-F, Study on Demulsification of Crude Oil Emulsions by Microwave Chemical Method, *Separation Science and Technology*, Vol. 42(6), Jan. 2007, pp. 1367-1377(11).
- [135] Al-Sahhaf T, Elsharkawy A, Fahim M, Stability of Water-in-Crude Oil Emulsions: Effect of Oil Aromaticity, Resins to Asphaltene Ratio, and pH of Water, *Petroleum Science and Technology*, Vol. 26(17), Jan. 2008, pp. 2009-2022(14).
- [136] Arriola-Medellin AM, Peralta-Martinez MV, Palacios-Lozano EM, Sanchez-Sanchez R, The Effect of Surfactant Content and Mixing Speed on the Properties of Vacuum Residua in Water Emulsions, *Petroleum Science and Technology*, Vol. 26(12), Aug. 2008, pp. 449-458(10).
- [137] Frising T, Noik C, Dalmazzone C, Peysson Y, Palermo T, Contribution of the Sedimentation and Coalescence Mechanisms to the Separation of Concentrated Water-in-Oil Emulsions, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 29(6), June 2008, pp. 827-834(8).
- [138] Less S, Hannisdal A, Sjoblom J, An Electrorheological Study on the Behavior of Water-in-Crude Oil Emulsions Under Influence of a DC Electric Field and Different Flow Conditions, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 29(1), Jan. 2008, pp. 106-114(9).
- [139] Quintero CG, Noik C, Dalmazzone C, Grossiord JL, Modelling and characterisation of diluted and concentrated water-in-crude oil emulsions: comparison with classical behaviour, *Rheologica Acta*, Vol. 47(4), May 2008, pp. 417-424(8).
- [140] Rondón M, Pereira JC, Bouriat P, Gracia A, Lachaise J, Salager J-L, Breaking of Water-in-Crude-Oil Emulsions. 2. Influence of Asphaltene Concentration and Diluent Nature on Demulsifier Action, *Energy & Fuels* 2008, 22, 702–707.
- [141] Silset A, Emulsions (w/o and o/w) of Heavy Crude Oils. Characterization, Stabilization, Destabilization and Produced Water Quality, PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, November 2008.
- [142] Visintin RFG, Lockhart TP, Lapasin R, D'Antona P, Structure of waxy crude oil emulsion gels, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* Vol. 149(1-3), 15 February 2008, pp. 34-39, International Workshop on Mesoscale and Multiscale Description of Complex Fluids.
- [143] Al-Sabagh AM, Noor El-Din MR, Abo-El S, Nasser NM, Investigation of the Demulsification Efficiency of Some Ethoxylated Polyalkylphenol Formaldehydes Based on Locally Obtained Materials to Resolve Water-in-Oil Emulsions, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 30(2), February 2009, pp. 266-275(10).
- [144] Al-Sabagh AM, Noor El-Din MR, Mohamed HM, Oil Base Mud. Part I: Synthesis of Some Local Surfactants Used as Primary Emulsifiers for Oil Base Mud and Evaluation of Their Rheology Properties, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 30(7), Aug. 2009, pp. 1079-1090(12).
- [145] Atta A, Abdel-Rahman A, Elsaed S, AbouElfotouh S, Hamad N, Demulsification of Crude Oil Emulsions Using Some New Water-Soluble Schiff Base Surfactant Blends, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 30(5), May 2009, pp. 725-736(12).



- [146] Borges B, Rondón M, Sereno O and Asuaje J, Breaking of Water-in-Crude-Oil Emulsions. 3. Influence of Salinity and Water-Oil Ratio on Demulsifier Action, *Energy Fuels*, 2009, 23(3), pp 1568–1574.
- [147] Henaut I, Courbaron A-C, Argillier JF, Viscosity of Concentrated Emulsions: Relative Effect of Granulometry and Multiphase Morphology, *J. Viscosity of Concentrated Emulsions: Relative Effect of Granulometry and Multiphase Morphology*, *Petroleum Science and Technology*, Vol. 27(2), Jan. 2009, pp. 182-196(15).
- [148] Mendoza M, Busca el IMP alternativas para el transporte de crudo extrapesado, [www.imp.mx/comunicacion/gaceta/?imp=nota&nota=090309dfr](http://www.imp.mx/comunicacion/gaceta/?imp=nota&nota=090309dfr), 10 Mar 2009.
- [149] Ocampo-Barrera R, Ramírez-de-Santiago M, García M, Tecnología Para Emulsionar Residuo de Vacío en Agua y Su Perspectiva de Aplicación Para el Transporte de Crudo Pesado y Extrapesado, XLIX Convención Nacional IMIQ, Octubre 2009.
- [150] Sanchez-Sanchez R, Manzanares-Papayanopoulos E, Herrera-Velarde JR, Arriola-Medellin AM, Peralta-Martinez MV, Scaling up an Emulsions Production System of Heavy Oil Liquid Residuals in Water, *Petroleum Science and Technology*, Vol. 27(13), Jan. 2009, pp. 1480-1493(14).
- [151] de Oliveira MCK, Carvalho RM, Carvalho AB, Couto BC, Faria FRD and Cardoso RLP, Waxy Crude Oil Emulsion Gel: Impact on Flow Assurance, *Energy Fuels*, 2010, 24 (4), pp. 2287–2293, DOI: 10.1021/ef900927.
- [152] Hasan SW, Mamdouh T. Ghannam MT, Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation, *Fuel* Vol. 89(5), May 2010, pp. 1095-1100, doi:10.1016/j.fuel.2009.12.021.
- [153] Silset A, Flaten GR, Helness H, Melin E, Øye G, Sjöblom J, A Multivariate Analysis on the Influence of Indigenous Crude Oil Components on the Quality of Produced Water. Comparison Between Bench and Rig Scale Experiments, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 31(3), March 2010, pp. 392-408.
- [154] Vlasak P y Chara Z Laminar and turbulent flow experiments with yield-power law slurries. *Powder Technology*, Vol. 104(3), Oct. 1999, pp. 200-206.
- [155] Ocampo-Barrera R, Villasenor R, Diego-Marin A, An experimental study of the effect of water content on combustion of heavy fuel oil/water emulsion droplets, *Combustion and Flame*, Vol. 126(4), Sept. 2001, pp. 1845-1855(11).
- [156] ] Ramírez M, Ocampo R., Ramírez I., Desarrollo de un combustible emulsionado a base de residuos de la refinación dispersos en agua. LATCYM 2005. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. (2005)
- [157] Szeri AZ, Wang SH, An elasto-plasto-hydrodynamic model of strip rolling with oil/water emulsion lubricant, *Tribology International*, Vol. 37(2), Feb. 2004, pp. 169-176(8).
- [158] Yang H, Schmid SR, Kasun TJ, Reich RA, Elastohydrodynamic film thickness and tractions for oil-in-water emulsions, *Tribology transactions* 2004, vol. 47(1), pp. 123-129.
- [159] Dubey SP, Sharma GK, Shishodia KS, Sekhon GS, A study of lubrication mechanism of oil-in-water (O/W) emulsions in steel cold rolling, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 57(5), 2005, pp. 208-212(5).
- [160] Klinkesorn UK, Sophanodora P, Chinachoti P, McClements DJ, Decker EA, Increasing the oxidative stability of liquid and dried tuna oil-in-water emulsions with electrostatic layer-by-layer deposition technology, *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 53, 2005a, pp4561-4566.

- [161] Dymaczewski Z, Jez-Walkowiak J, Sozanski MM, A concept for the optimisation of the hydraulic transport of sludge. Environmental Engineering: Proceedings of the Second National Congress of 7. Environmental Engineering, Lublin, Poland, September 2005, pp. 276-280.
- [162] Gutierrez G, Lobo A, Allende D, Cambiella A, Pazos C, Coca J, Benito JM. Influence of Coagulant Salt Addition on the Treatment of Oil-in-Water Emulsions by Centrifugation, Ultrafiltration, and Vacuum Evaporation, Separation Science and Technology, Vol. 43(7), May 2008, pp. 1884-1895(12).
- [163] Knudsen JC, Øgødal LH, Skibsted LH, Droplet surface properties and rheology of concentrated oil in water emulsions stabilized by heat-modified beta-lactoglobulin, Langmuir, 2008 Mar 18;24(6):2603-10. Epub 2008 Feb 21.
- [164] Gardea-Villegas H, Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos. Caso de los lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras, Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. IX, No. 2, 2008. pp 87-97.
- [165] Slatter P, Pipe flow of highly concentrated sludge. Journal of Environmental Science and Health, Part A, Vol. 43(13), November 2008, pp 1516 – 1520.
- [166] Hu X, Wang Y, Jing H, Application of oil-in-water emulsion in hot rolling process of brass sheet, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 62(4), 2010, pp. 224-231(8).
- [167] Liran M, Jianbin L, Chehui Z, Film Forming Characteristics of Oil-in-Water Emulsion with Super-Low Oil Concentration, Advanced Tribology 2010, Part 3, I., 188-190.
- [168] Sun C, Gunasekaran S, Rheology and Oxidative Stability of Whey Protein Isolate-Stabilized Menhaden Oil-in-Water Emulsions as a Function of Heat Treatment, Journal of Food Science, Vol. 75(1), January/February 2010, pp. C1-C8(8).
- [169] Lasheras JC, Fernandez-Pello AC, Dryer FL, Initial Observations on the Free Droplet Combustion Characteristics of Water-In-Fuel Emulsions Combustion Science and Technology, Vol. 21(1&2), Dec. 1979, pages 1-14.
- [170] Ballester JM, Fueyo N, Dopazo C, Combustion characteristics of heavy oil-water emulsions, Fuel Vol. 75(6), May 1996, pp. 695-705, Ballester et al. 1996
- [171] Canfield CA, Effects of diesel—water emulsion combustion on diesel engine nox emissions, MSc Thesis, University of Florida 1999.
- [172] Selim MYE y Elfeky SMS, Effects of diesel/water emulsion on heat flow and thermal loading in a precombustion chamber diesel engine, Applied Thermal Engineering, Vol. 21(15), Oct. 2001, pp. 1565-1582(18).
- [173] Diego A, Martínez MA, Gustavo A. Tamayo GA, Alarcón E, Meléndez C, Desarrollos en la tecnología para la combustión de emulsiones agua en combustóleo mexicano, Boletín IIE, mayo-junio del 2001, pp. 118-125.
- [174] Matthews RD, Emulsified Diesel Fuels: Literature Review And Consolidation Of Lubrizol Recommendations, Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, Research Report 4576-1, 2002.
- [175] Dollo G, Le Corre P, Guérin A, Chevanne F, Burgot JL and Leverage R, Spray-dried redispersible oil-in-water emulsion to improve oral bioavailability of poorly soluble drugs, European Journal of Pharmaceutical Sciences Vol. 19(4), July 2003, pp. 273-280.
- [176] Klinkerson U, Sophanodora P, Chinachoti P, McClements DJ, Decker EA, Stability of Spray-dried tuna oil emulsions encapsulated with two-layered interfacial membranes, J Agric Food Chem. 2005 Oct 19;53(21):8365-8371.

- [177] Lif A, Holmberg K, Water-in-diesel emulsions and related systems, *Advances in Colloid and Interface Science* 123–126 (2006) 231–239.
- [178] Sanchez R, Peralta MV, Gonzalez JM, Herrera JR, Arriola AM, Manzanares E, Romo CA, Palacios EM, Alternativas tecnológicas para el manejo, de crudos pesados de alta viscosidad y residuales del petróleo, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Boletín IIE, 2006.
- [179] Watanabe H, Harada T, Hoshino K, Matsushita Y, Aoki H, Miura T, An Experimental Investigation of the Characteristics of the Secondary Atomization and Spray Combustion for Emulsified Fuel, *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 41, 1110-1118 (2008).
- [180] Ochoterena R, Optical Diagnostics of Soot in Combustion Sprays, PhD. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2009.
- [181] Broniarz-Press L, Ochowiaka M, Rozanska J, Woziwodzka S, The atomization of water–oil emulsions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33(6), Sept. 2009, pp. 955-962.
- [182] Tratnig A, Brenn G, Strixner T, Fankhauser P, Laubacher N, Stranzinger M, Characterization of spray formation from emulsions by pressure-swirl atomizers for spray drying, *Journal Of Food Engineering*, Vol. 95(1), pp. 126-134, Nov 2009.
- [183] Bolszo CD, Narvaez AA, Dunn-Rankin D, McDonell VG, Sirignano WA, Pressure Swirl Atomization of Water-in-Oil Emulsions, ILASS Americas, 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Cincinnati, OH, May 2010.
- [184] Qin KD, Tank H, Wilson S, Downer B, Liu L, Controlling Droplet-Size Distribution Using Oil Emulsions In Agricultural Sprays, *Atomization And Sprays* Vol. 20(3), pp. 227-239, 2010.
- [185] Watanabe H, Matsushita Y, Aoki H, Miura T, Numerical simulation of emulsified fuel spray combustion with puffing and micro-explosion, *Combustion And Flame* Vol. 157(5), pp. 839-852, May 2010.

## Artículos e informes generados relacionados con esta tesis.

i) Informes [I] internos para el Instituto Mexicano del Petróleo (confidenciales).

[1I] Dimensionamiento del Mezclador de Emulsión –dentro del Proyecto D.00434 “Evaluación de la combustión de emulsiones de residuos de vacío en agua”, E. Medina, Informe Final –Interno, Laboratorio de Sistemas de Combustión, Instituto Mexicano del Petróleo, julio 2007.

[2I] Algunas Observaciones sobre el Comportamiento de Emulsiones Aceite en Agua (O/W), E. Medina, Informe Interno, Laboratorio de Sistemas de Combustión, Instituto Mexicano del Petróleo, julio 2008.

ii) Trabajos para revistas [R] y congresos [C].

[3C] “Contribution of the IMP Combustion Laboratory to improve the handling and use of Mexican heavy refinery residual fuels” Chávez A, Ramirez M, Bolado R, Ocampo R, Escalera R, Mora J, y Medina E, edición conmemorativa del 75 aniversario del Prof. F. Mayinger de la TU Munchen, 2006.

[4C] “Contribución del Laboratorio de Combustión del IMP a mejorar el manejo y uso de combustibles mexicanos residuales extrapesados”. Chávez A, Ramirez M, Ocampo R, Escalera R, Mora J, Tapia Z, Bolado R, y Medina E, 4th Int. Workshop on Combustion Modelling and Technology, Guanajuato, 2006.

[5R] “Caracterización Preliminar de Atomizador Neumático Mediante Anemometría de Fase Doppler (PDA)” E. Medina, A. Chávez, R. Bolado, revista de la SOMIM, vol. 2, núm. 3, pp 69-77, 2006.

[6C] “Determinación del Campo de Velocidades Generado en un Líquido Viscoso por la Acción de dos Rotores de Paletas Planas en una Cavidad Cilíndrica Utilizando PIV-2D”, E. Medina, A. Chávez, M. Ramírez, R. Bolado, F. Solorio, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica –CIBIM8, Cusco, Perú, oct. 2007.

[7C] “Alternativas de Manejo Económico de Fluidos en Tuberías”, E. Medina, M. Ramírez, A. Chávez, R. Bolado, F. Solorio, VI Conferencia Científica Internacional Medio Ambiente Siglo XXI (MAS XXI 2009).

[8C] “Algunas Observaciones sobre el Comportamiento de Emulsiones Aceite en Agua (O/W)” E. Medina, A. Chávez, M. Ramírez, R. Bolado, y F. Solorio, XVI congreso de la SOMIM, 2010.

[9C] “Caracterización de Atomizador Neumático Mediante Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) en 2D”, E. Medina, A. Chávez, R. Bolado, F. Solorio, XVI congreso de la SOMIM, 2010.

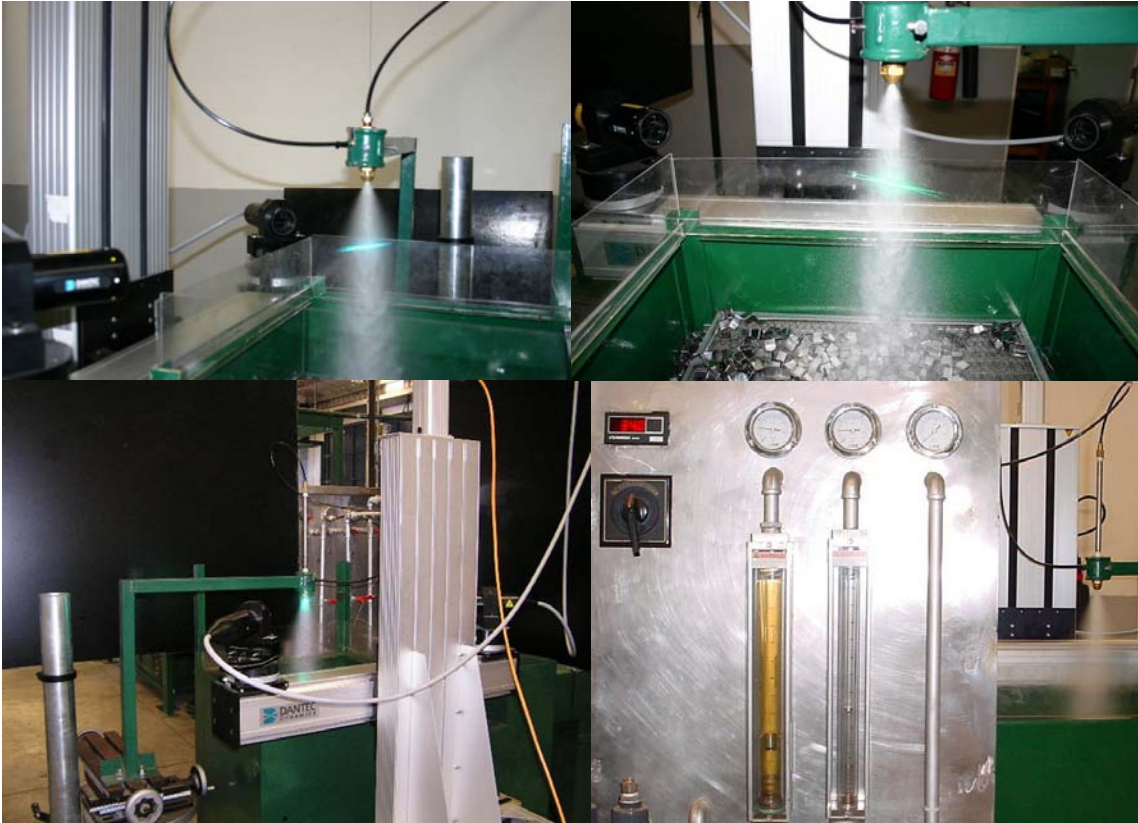
[10R] “On the behavior of oil-in-water emulsion sprays”, Medina E, Chávez A, Ramírez M, Bolado R, y Solorio F, Experimental Thermal and Fluid Science, (Sometido en marzo 2011).

[11C] “Caracterización de Atomizador Neumático Mediante Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) en 2 y 3D”, E. Medina, A. Chávez, R. Bolado, y F. Solorio, 10º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica –CIBIM10, Oporto, Portugal, aceptado para su presentación.

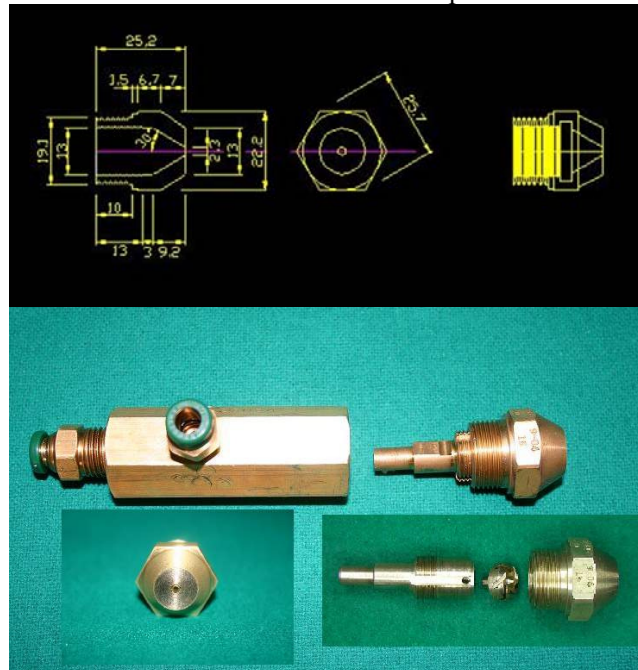
## Material gráfico adicional.

### Capítulo 2. Caracterización de Sprays con PDA y PIV (2D y3D).

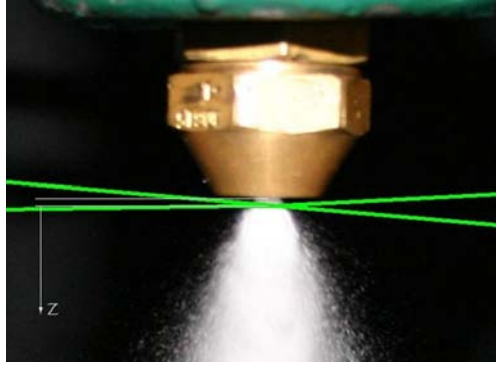
a) PDA



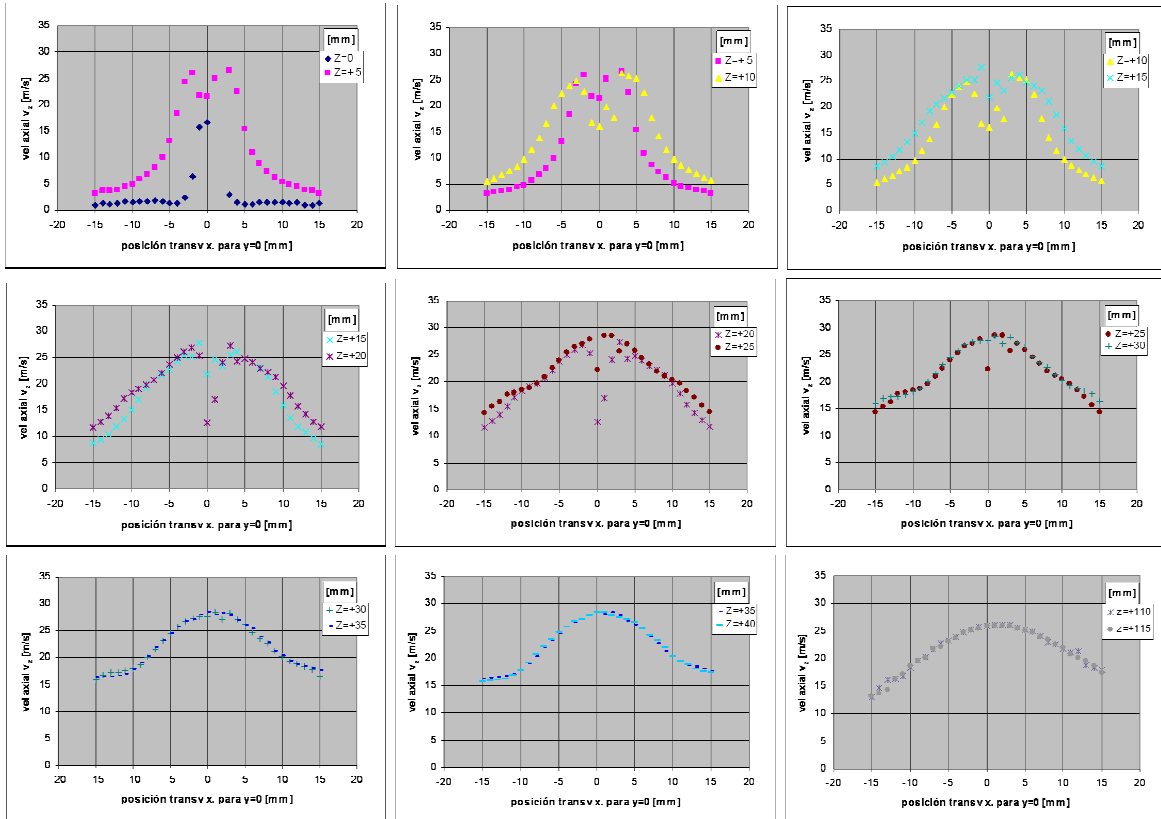
A2.1. Vistas de la instalación experimental



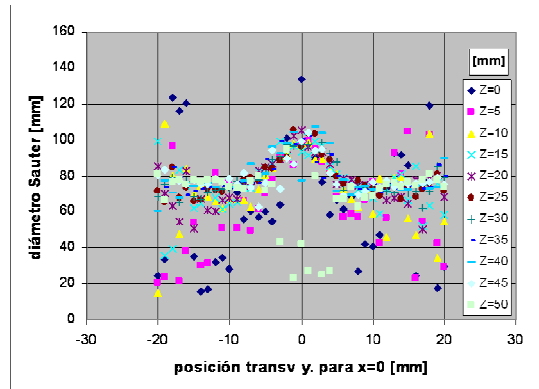
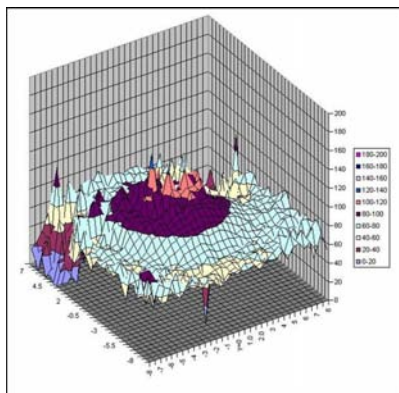
A2.2. Vistas de la boquilla utilizada en todos los experimentos



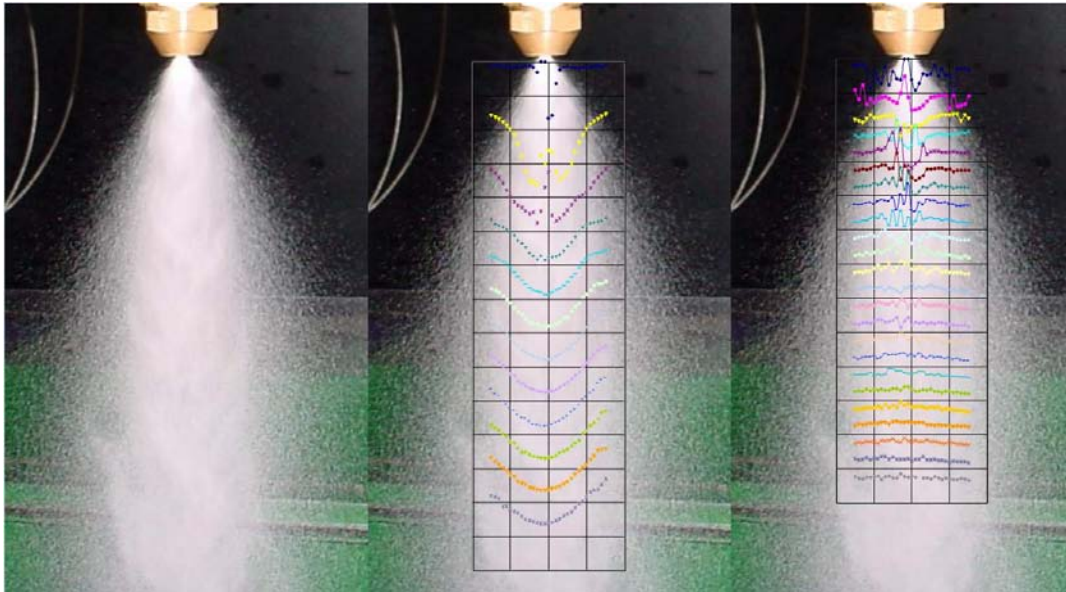
A2.3. Detalle del sistema de referencia de las mediciones.



A2.4. Perfiles de la velocidad axial  $u_z$  para varios valores de  $Z$ .



A2.5. Distribución de  $D_{32}$  para  $Z=5\text{mm}$  (izq.) y varios valores de  $Z$  (der.)

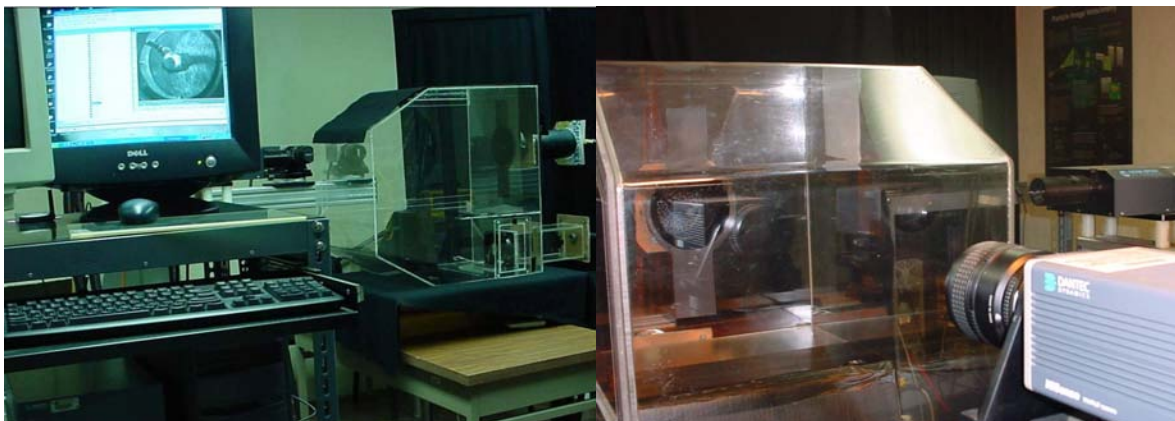


A2.6. Distribución de velocidad axial (centro) y  $D_{32}$  a lo largo del spray (der.)

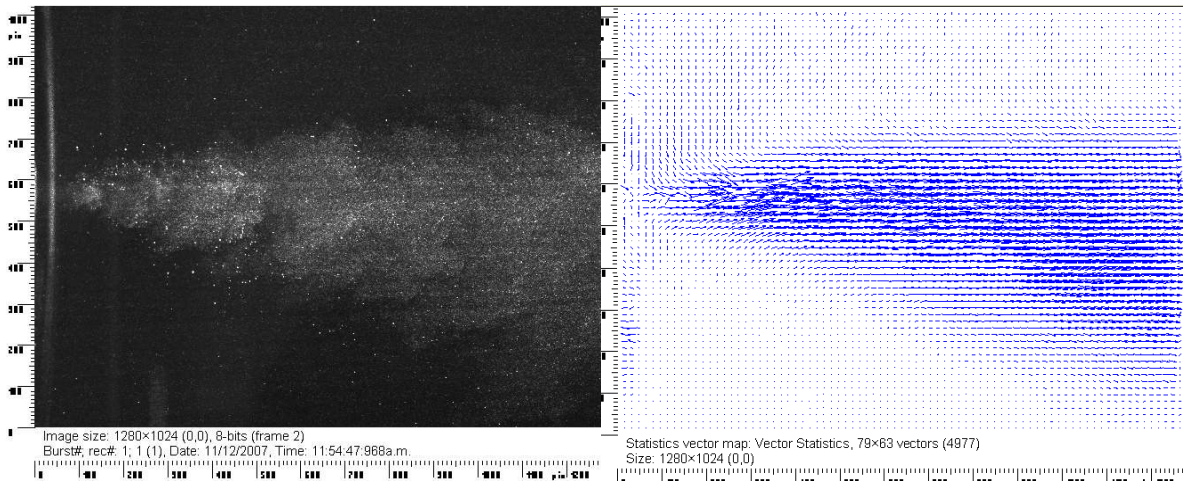
b) PIV



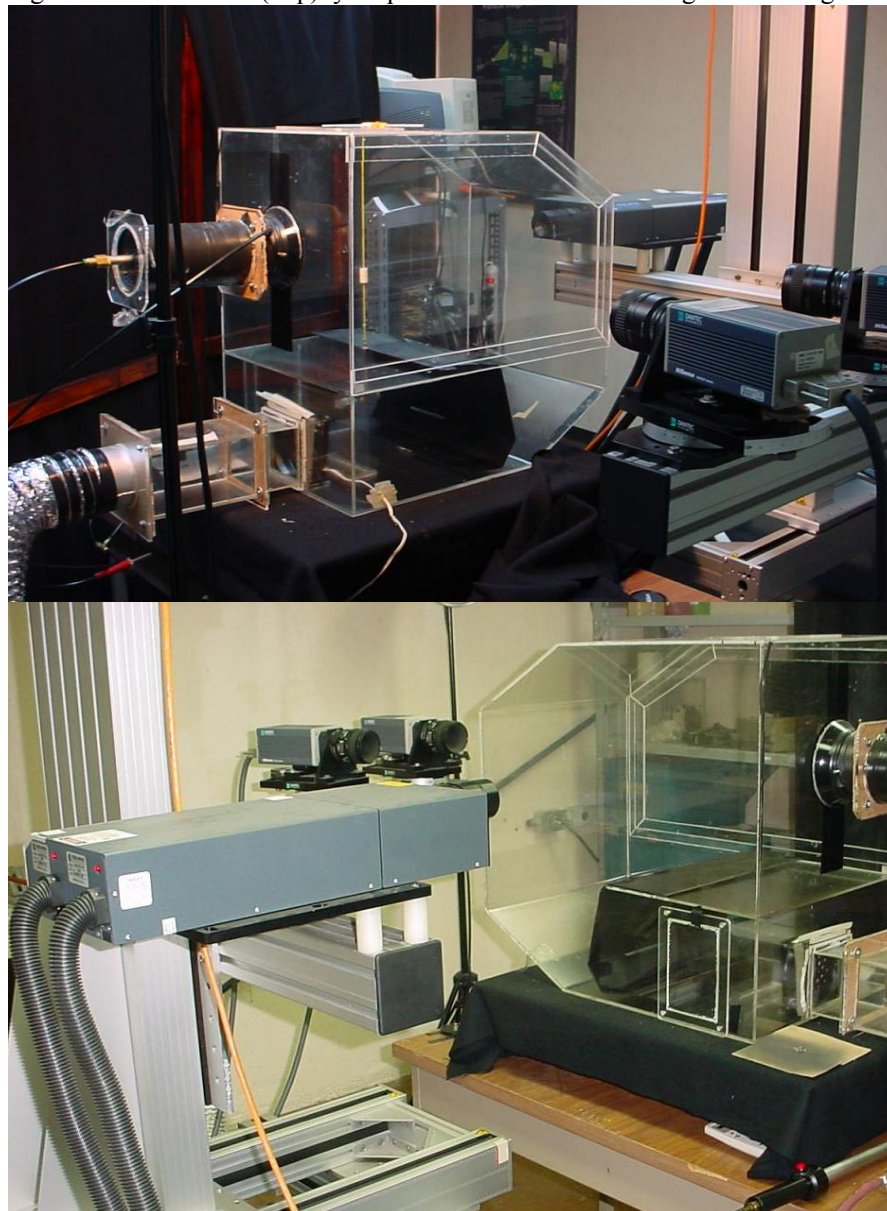
A2.7. Vista general del arreglo experimental (izq.) y componentes del PIV (der.)



A2.8. Arreglos PIV-2D longitudinal (izq.) y transversal (der.)



A2.9. Imagen de cámara CCD (izq.) y mapa de vectores con la configuración longitudinal (der.)

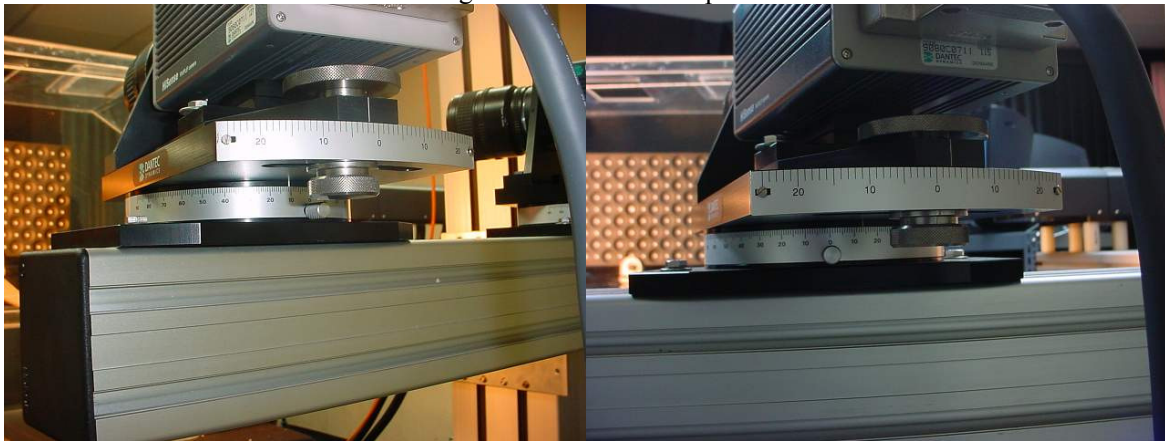


A2.10. Arreglos PIV-3D longitudinal (superior) y transversal (inferior)

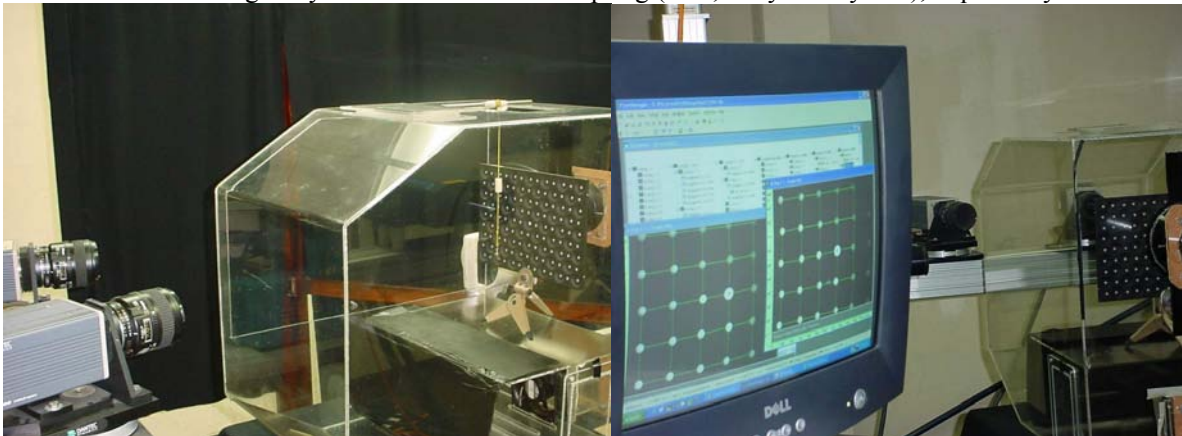




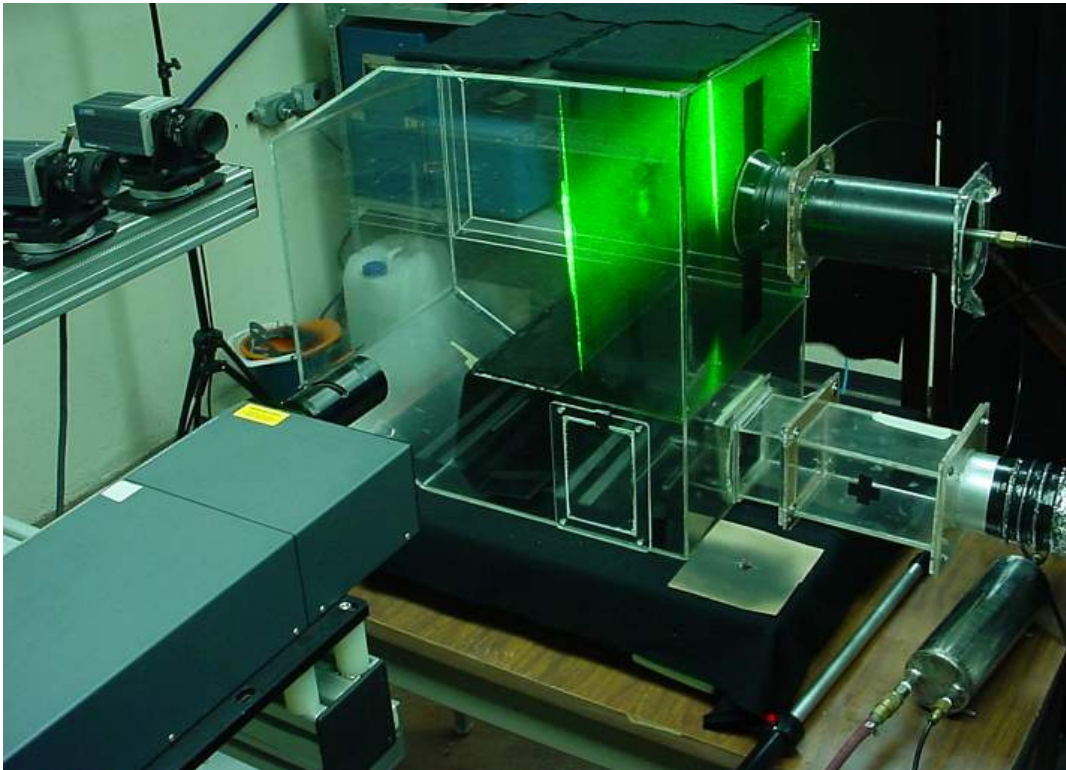
A2.11. Arreglos de cámaras CCD para PIV-3D



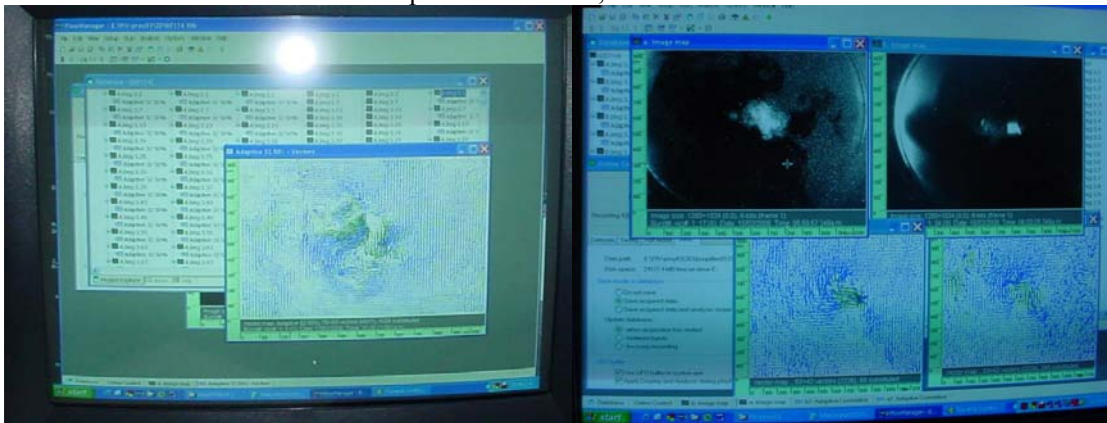
A2.12. Posición angular y correcciones de Scheimpflug ( $-11^\circ$ ,  $-2^\circ$  y  $+14^\circ$  y  $+2^\circ$ ), izquierda y derecha.



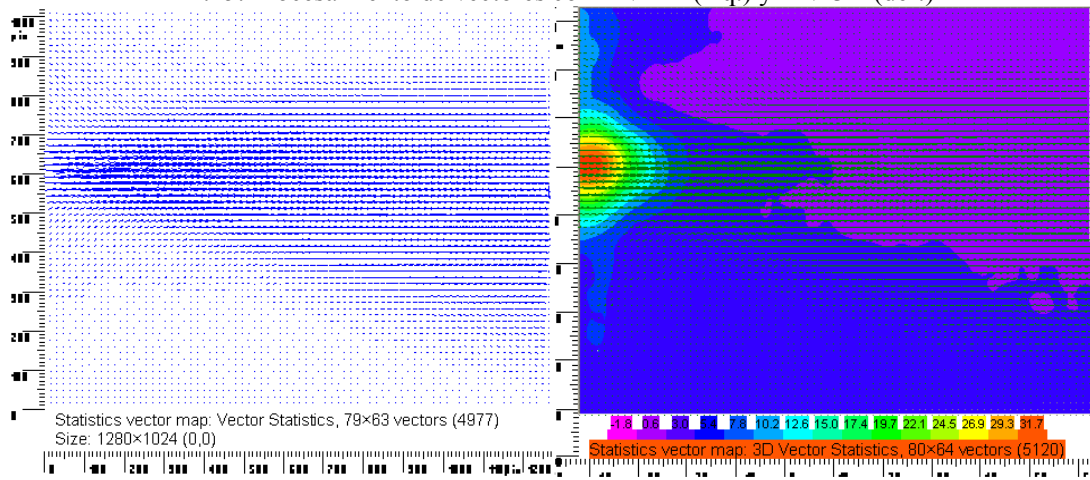
A2.13. Plantilla de calibración (izq.), imágenes de calibración a cada cámara (der.)



A2.14. Operación PIV-3D, modo transversal.

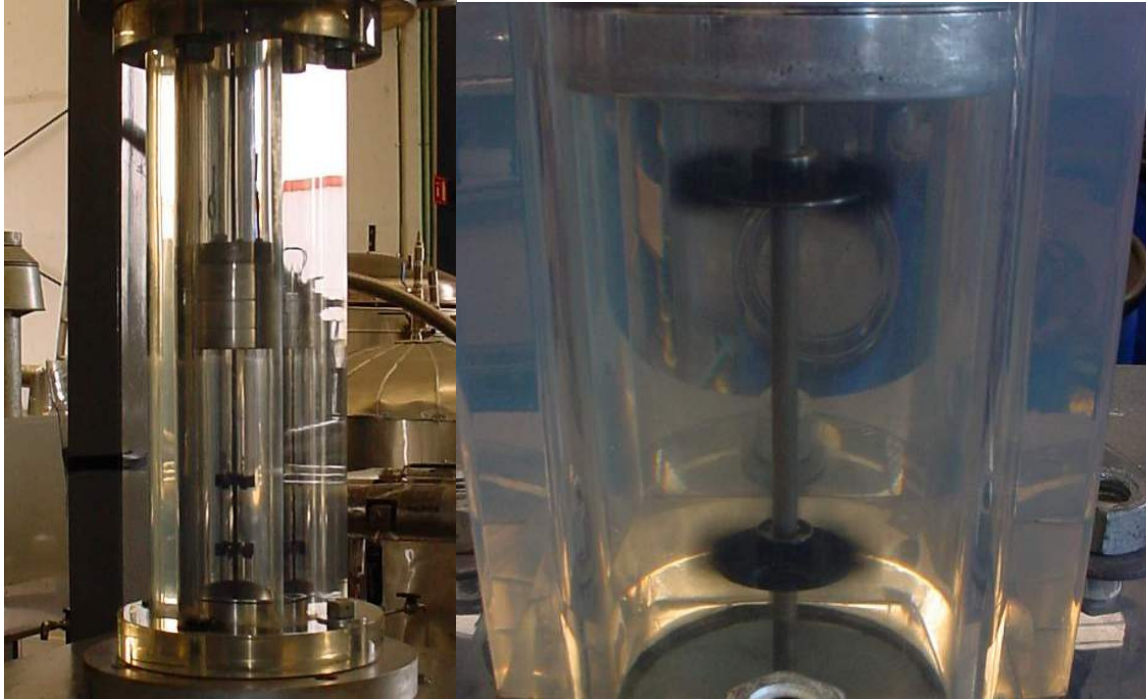


A2.15. Procesamiento de vectores con PIV-2D (izq.) y PIV-3D (der.)

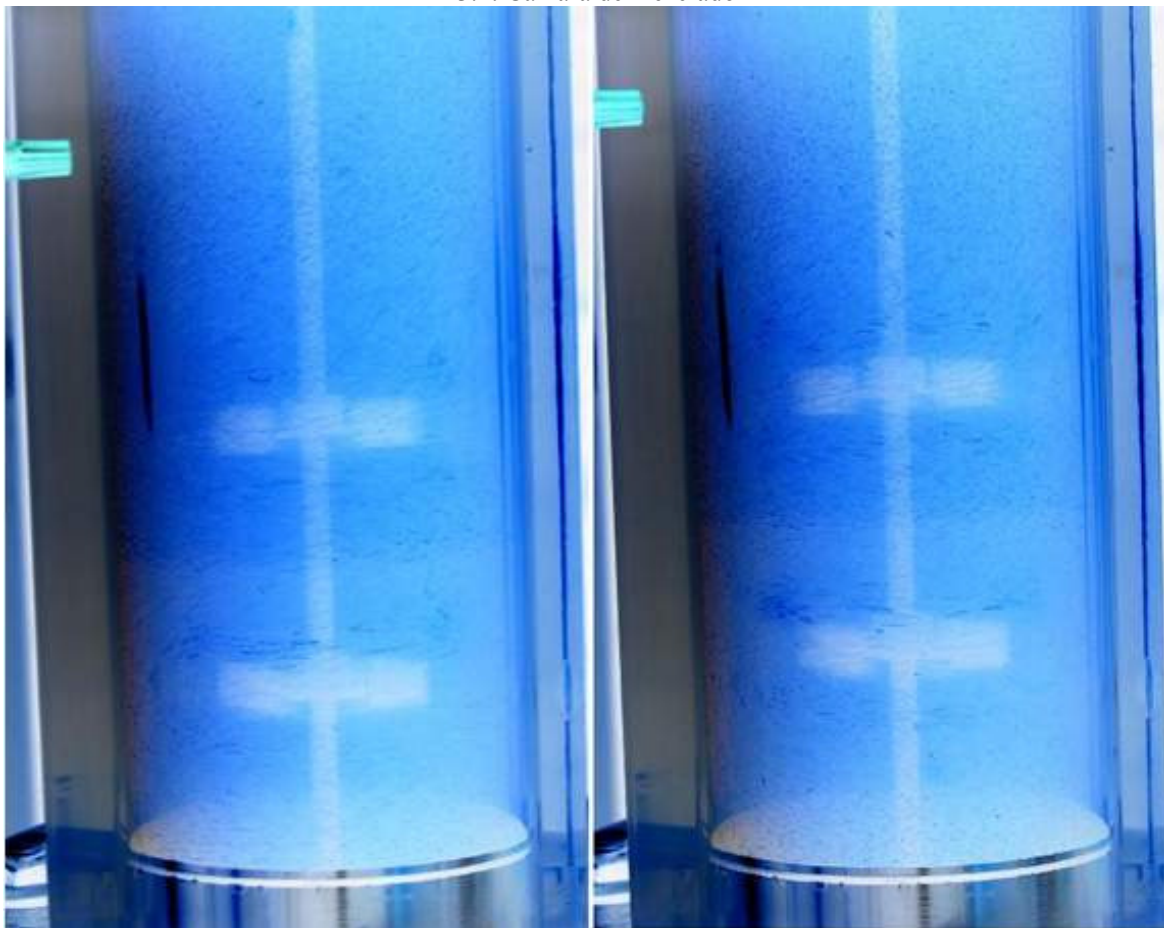


A2.16. Mapa de vectores PIV-3D, 1 cámara (izquierda), 2 cámaras (derecha)

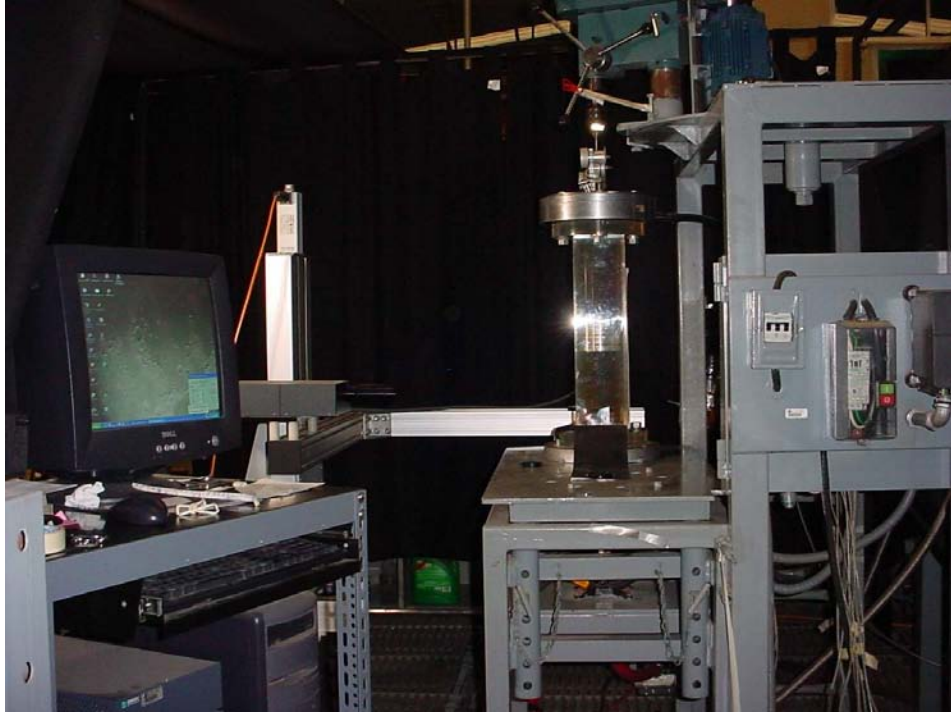
### Capítulo 3. Análisis de Mezcladores.



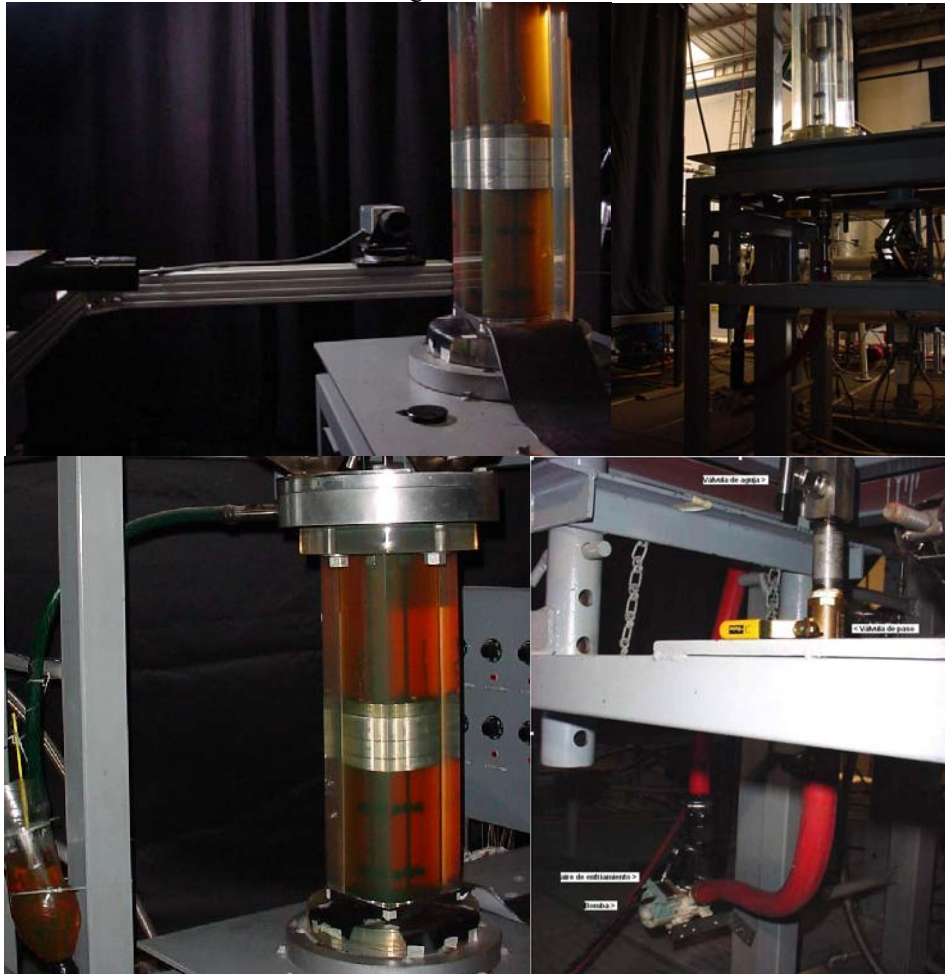
A3.1. Cámara de mezclado



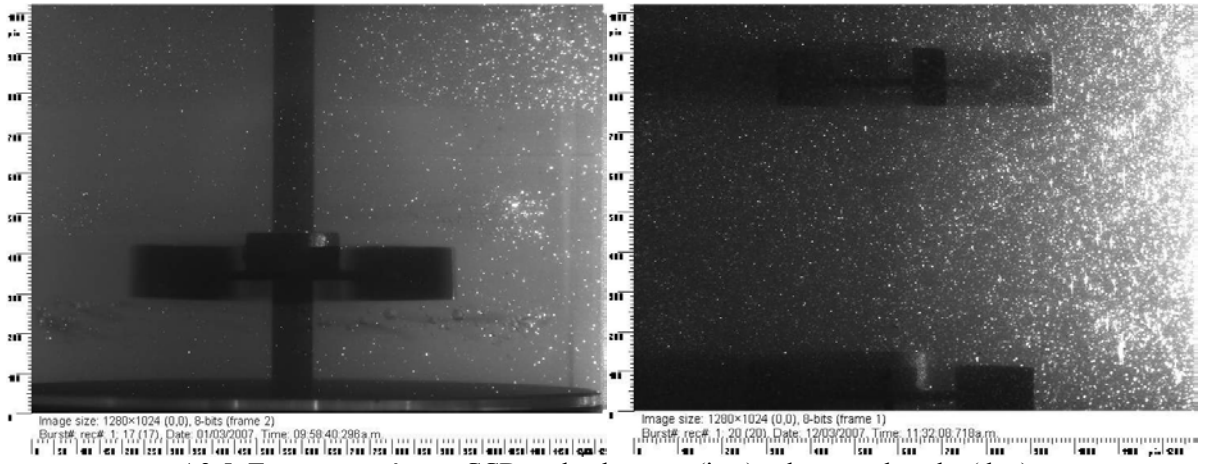
A3.2. Visualización en cámara de mezclado



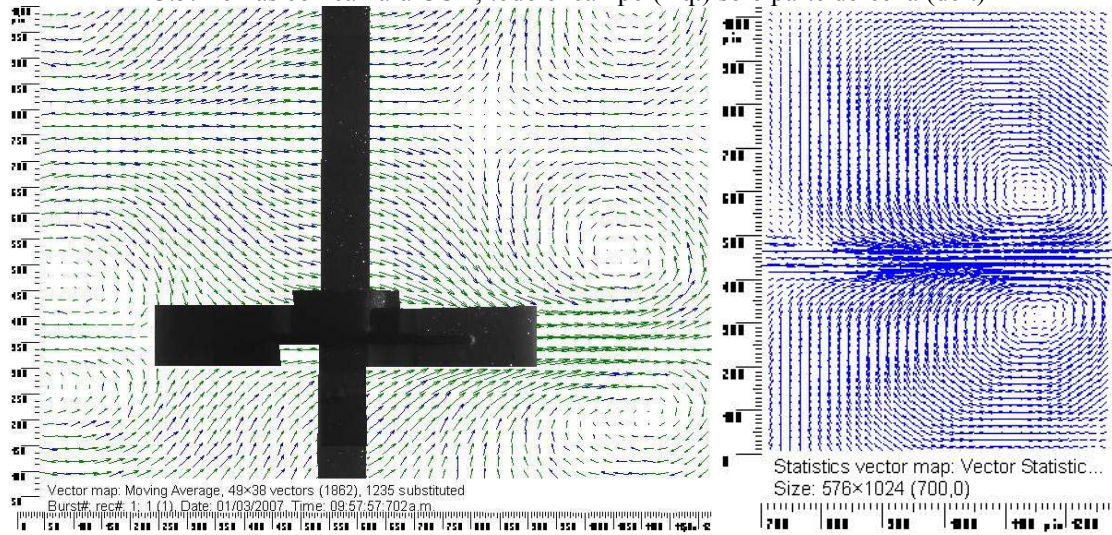
A3.3. Vista general de la instalación



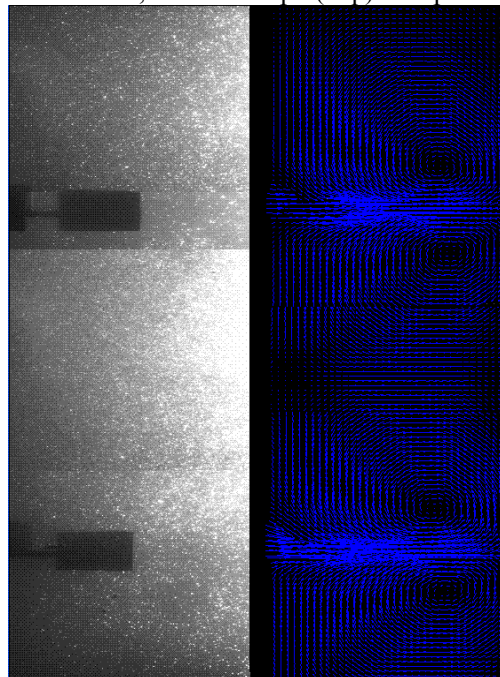
A3.4. Vistas de detalles de la instalación.



A3.5. Tomas con cámara CCD, todo el campo (izq.) solo parte derecha (der.)



A3.6. Mapas de vectores, todo el campo (izq.) solo parte derecha (der.)



A3.7. Imágenes y mapas de vectores, imagen compuesta, solo parte derecha.

## Capítulo 4: Fabricación y caracterización de emulsiones aceite en agua (O/W)



A4.1 Las emulsiones producidas en laboratorio.



A4.2 Apariencia de E08, E09, E12, y E13.



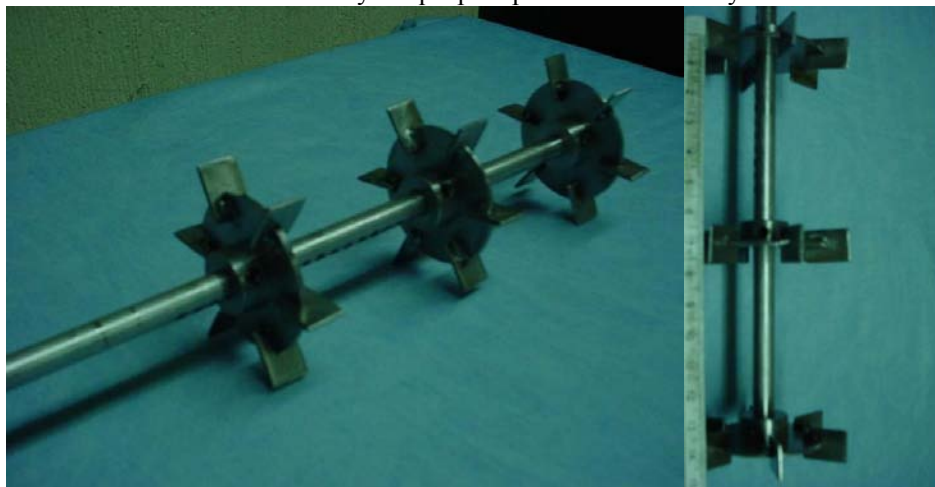
A4.3 MalvernSizer 2000



A4.4. Reómetro Haake RS150 con control de temperatura y sensor de cilindros concéntricos.



A4.5. Mezclador y tanque para producción de E20 y E21



A4.6. Arreglo de rotores Rushton.



A4.7. Producción de E20 y E21.

## Capítulo 5. Sprays de emulsiones OW.

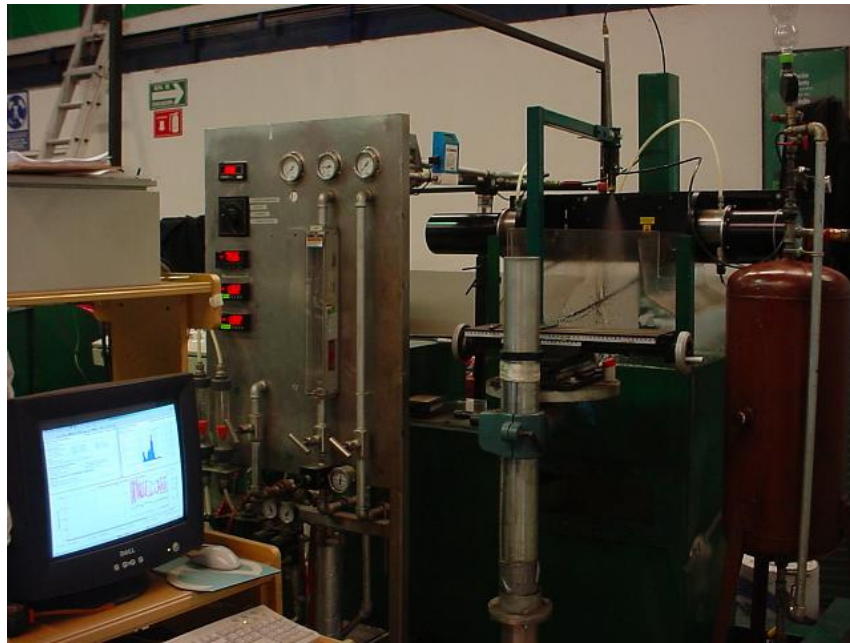


Figura A5.1. Vista general de la instalación experimental.

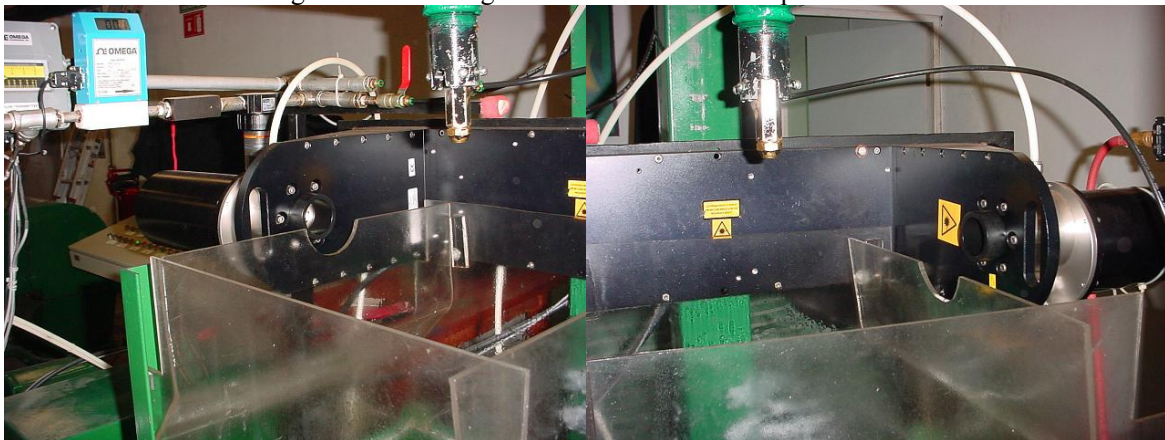


Figura A5.2a. Detalles de la instalación experimental.



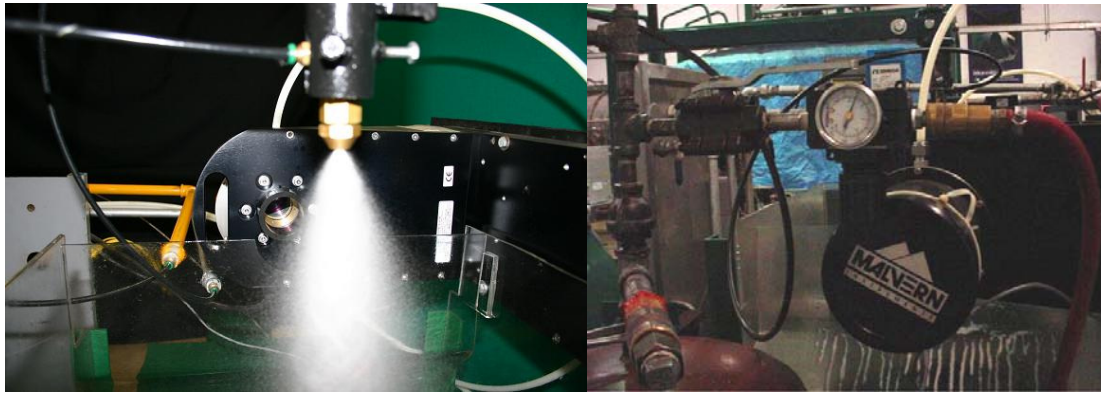


Figura A5.2b. Detalles de la instalación experimental.

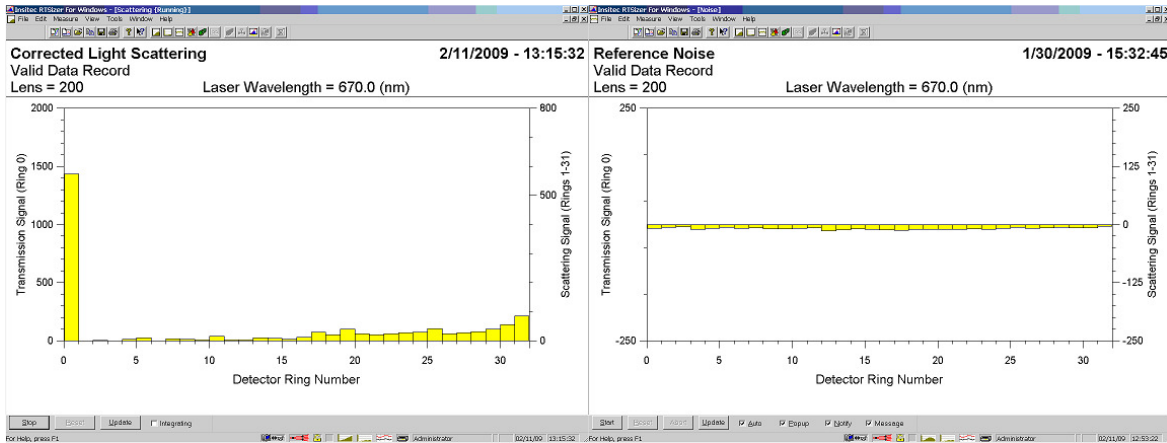


Figura A5.3. Parámetros de ajuste de Malvern RTSizer.

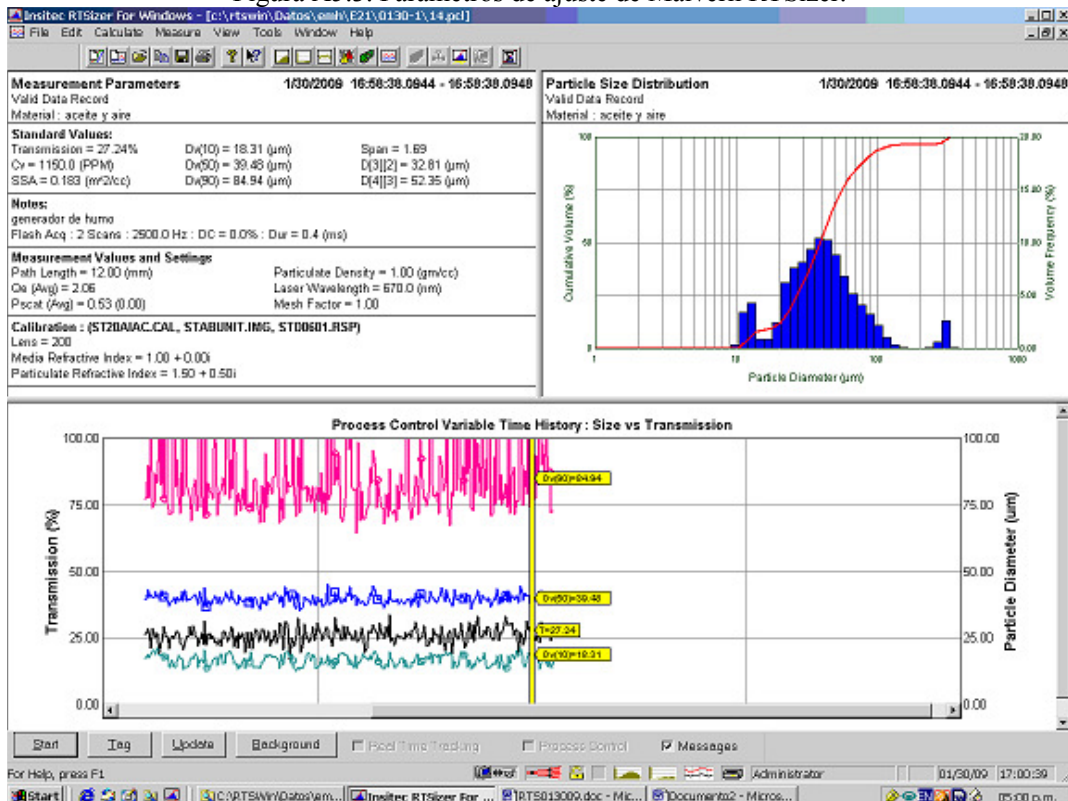


Figura A5.4. Procesamiento de la señal.

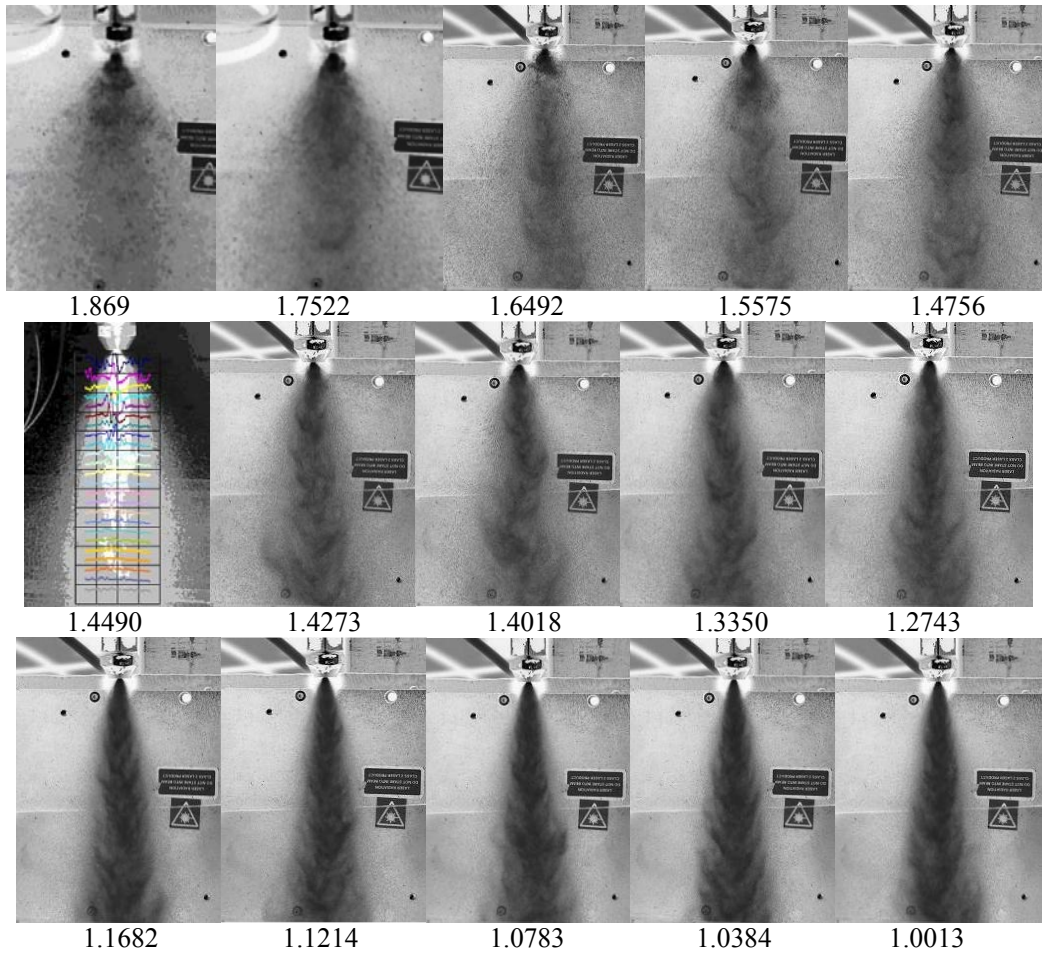
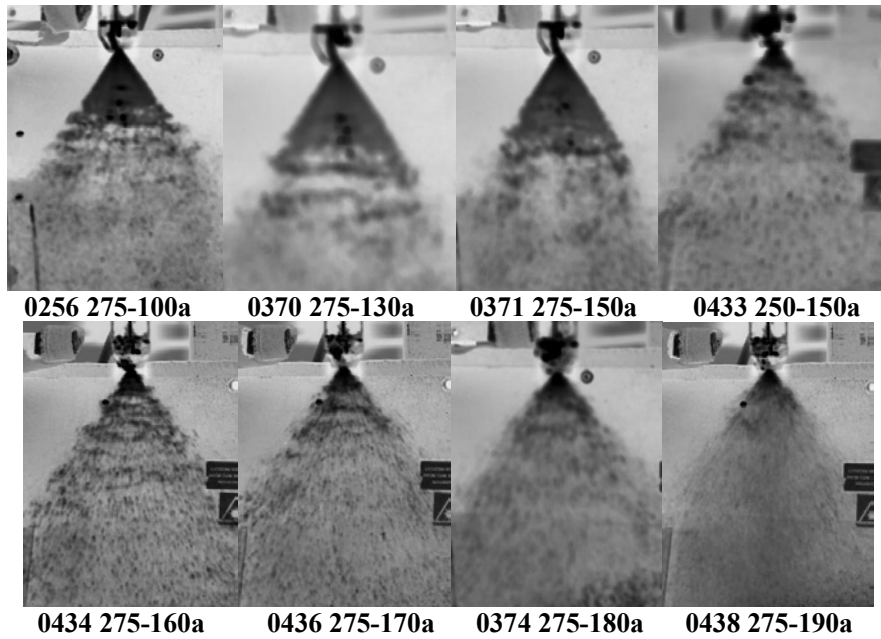
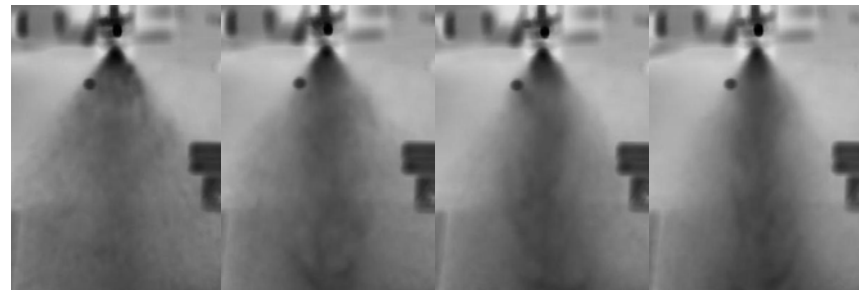
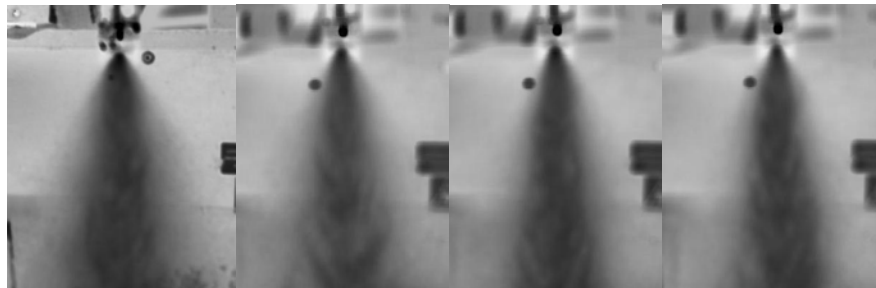


Figura A5.5. Serie fotográfica de sprays aceite-aire en función de  $r_p$ .



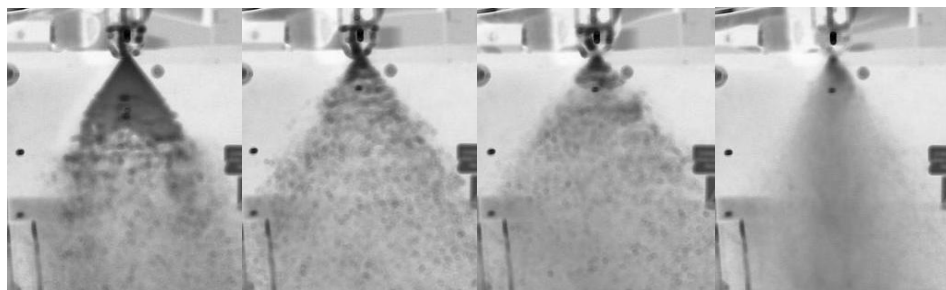


**0440 275-200a    0441 275-211a    0442 275-220a    0443 275-230a**

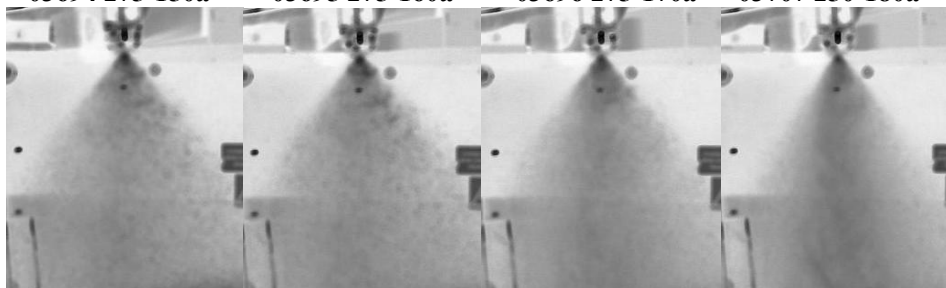


**0378 275-240a    0445 275-250a    0446 275-260a    0447 275-270a**

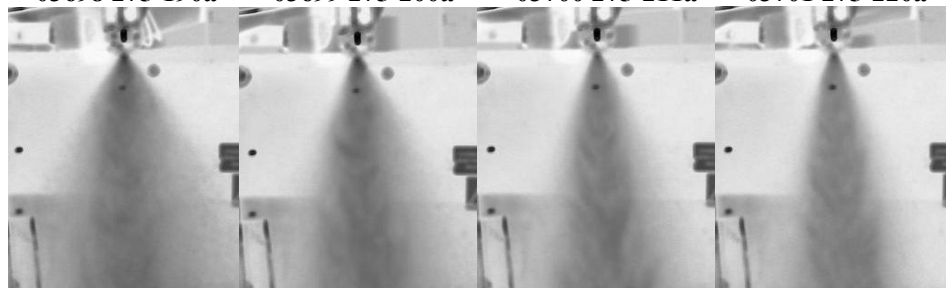
Figura A5.6. Serie fotográfica de sprays emulsión E20-aire.



**03694 275-150a    03695 275-160a    03696 275-170a    03707 250-180a**



**03698 275-190a    03699 275-200a    03700 275-211a    03701 275-220a**



**03703 275-240a    03704 275-250a    03705 275-260a    03706 275-270a**

Figura A5.7. Serie fotográfica de sprays emulsión E21-aire.



Figura A5.8. Emulsiones E20 y E21 después del paso por la boquilla de atomización.



Figura A5.9. Emulsiones E21 después del paso por la boquilla de atomización, sin ruptura (izquierda), ruptura baja (centro), ruptura alta (derecha).



Figura A5.10. Emulsión E21-11 después del paso por la boquilla de atomización, original (izquierda y centro), depurada (derecha)



Figura A5.11. Emulsión E21-11 después del paso por la boquilla de atomización, depurada (izquierda y centro) al 13/02/09, al 15/07/10 (derecha)