



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Maestría y Doctorado en Ciencias Bioquímicas

Efecto de la posición espacial, dentro de un tanque agitado sobre la dispersión de gotas de aceite y burbujas de aire en dos sistemas bifásicos y un sistema trifásico.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
Maestro en Ciencias

PRESENTA:
Axel Falcón Rojas

Dr. Enrique Galindo Fentanes
Instituto de Biotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Gabriel Corkidi Blanco
Instituto de Biotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Gabriel Ascanio Gasca
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. Universidad Nacional Autónoma de México

MÉXICO, D. F. septiembre, 2014



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.

El presente trabajo se realizó en el Departamento de Ingeniería Celular y Biocatálisis del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la asesoría del Dr. Enrique Galindo Fentanes. Durante la realización de este trabajo se contó con el apoyo de la beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y con financiamiento del proyecto CONACyT número 59807

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Dr. Enrique Galindo Fentanes por dejarme formar parte de su grupo de trabajo y por la asesoría y apoyo brindado durante el desarrollo del presente trabajo.

Mi agradecimiento a la Dra. María Soledad Córdova Aguilar por todo el apoyo técnico y la asesoría para la realización de este trabajo. Así como, por su amistad y los oportunos consejos profesionales y personales que siempre tuvo.

Al comité tutorial integrado por el Dr. Gabriel Ascanio Gasca y Gabriel Corkidi Blanco por los comentarios realizados para el desarrollo de este trabajo.

A los miembros del jurado, por sus oportunos comentarios y correcciones:

Dr. Edmundo Castillo Rosales

Dra. Laura Alicia Palomares Aguilera

Dr. Alberto Tecante Coronel

Dra. María Soledad Córdova Aguilar

Dr. Mario Rodríguez Monrroy

Mi mayor agradecimiento para mi padre Alfonso Falcón, mi madre Angelina Rojas, mis hermanos Poncho y Anibal y toda mi familia por todo el cariño y apoyo incondicional que siempre han demostrado.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	JUSTIFICACIÓN.....	3
3.	ANTECEDENTES.....	5
3.1.	Dispersiones	5
3.2.	Dispersiones multifásicas	5
3.3.	Dispersión bifásica líquido – gas	6
3.4.	Dispersión bifásica líquido–líquido	7
3.5.	Dispersión trifásica líquido – líquido – gas.....	8
3.6.	Caracterización de dispersiones.....	8
3.6.1.	Potencia	10
3.7.	Técnicas para la caracterización de dispersiones	11
3.7.1.	Sonda de succión capilar	12
3.7.2.	Sistemas láser.....	12
3.7.2.1	Anemometría láser	13
3.7.3.	Velocimetría de imágenes de partículas.....	14
3.7.4.	Análisis de imágenes	14
3.7.5.	Video de alta velocidad.....	15
3.7.6.	Video endoscopía de alta velocidad.....	16
3.8.	Estudios de caracterización de tanques de mezclado.....	17
3.9.	Antecedentes directos.....	18
4.	OBJETIVO	21
5.	ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.....	23
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	25
6.1.	Tanque de mezclado	25
6.2.	Medio y condiciones de operación.....	26
6.3.	Sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad ..	26
6.4.	Zonas de adquisición de videos	27
6.5.	Determinación de la potencia volumétrica	29
6.6.	Iluminación del sistema.....	30
6.7.	Calibración del sistema de video de alta velocidad.....	33

6.8. Montaje del sistema de videoendoscopia.....	34
6.9. Error calculado	38
6.10. Precisión y Exactitud	39
6.11. Adquisición y procesamiento de imágenes	40
6.11.1.Adquisición	40
6.11.2.Preproceso	40
6.11.3.Análisis de datos	40
6.11.4.Estadística	41
7. RESULTADOS.....	43
7.1. Potencia volumétrica	43
7.2. Selección del sistema de iluminación.....	44
7.3. Guía interna del endoscopio	44
7.3.1.Spot de 250 W y 1000 W	45
7.3.2.Lámpara de cono convencional	45
7.3.3.Luz de arco Xenón	46
7.4. Calibración del sistema.....	47
7.4.1.Error experimental	48
7.4.2.Verificación de la calibración	48
7.5. Imágenes obtenidas	49
7.6. Evaluación de la posición del endoscopio y la guía de luz en el sistema de videoendoscopia	51
7.7. Reproducibilidad de las mediciones	52
7.8. Sistema bifásico líquido - líquido	56
7.9. Sistema bifásico líquido – gas	60
7.10. Sistema trifásico líquido – líquido – gas.....	62
8. CONCLUSIONES	72
9. BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXO I Resultados de los análisis estadísticos	80
ANEXO II Cartel presentado en el XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.....	124
ANEXO III Cartel presentado en el XXIII Foro Norte Americano de Mezclado ..	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1.	Diagrama del sistema de endoscopía de alta velocidad.....	17
Figura 5-1.	Estrategia experimental seguida en este trabajo.....	24
Figura 6-1.	Tanque de mezclado de 6.7 L.....	25
Figura 6-2.	Sistema de endoscopía de alta velocidad.....	27
Figura 6-3.	Sistema de coordenadas cilíndricas dentro del tanque de mezclado.....	28
Figura 6-4.	Zonas de adquisición de imágenes dentro del tanque de mezclado.....	28
Figura 6-5.	Prototipo de reflexión de luz acoplado al endoscopio.....	31
Figura 6-6.	Iluminación por medio de Spot.....	31
Figura 6-7.	Lámpara de cono convencional.....	32
Figura 6-8.	Fuente de iluminación arco Xenón.....	32
Figura 6-9.	Prueba de iluminación con fuente de arco Xenón y guía de luz.....	33
Figura 6-10.	Imagen de la regleta graduada en micrómetros.....	34
Figura 6-11.	Montaje del sistema de videoendoscopía en el tanque de mezclado.....	34
Figura 6-12.	Configuración 1, endoscopio entre la guía de luz y el impulsor.....	35
Figura 6-13.	Vista superior del tanque de mezclado con el endoscopio, configuración 1.....	35
Figura 6-14.	Configuración 2, guía de luz entre el endoscopio y el impulsor.....	36
Figura 6-15.	Vista superior del tanque de mezclado con el endoscopio, configuración 2.....	36
Figura 6-16.	Configuración 3, guía de luz y endoscopio entre impulsor y pared del tanque.....	37
Figura 6-17.	Vista superior del tanque de mezclado con el endoscopio, configuración 3.....	37
Figura 6-18.	Arreglo para cálculo de distancia focal.....	39
Figura 6-19.	Medición de diámetros de gotas utilizando la herramienta del programa....	41
Figura 6-20.	Exportación de los datos obtenidos a una hoja de cálculo.....	41
Figura 7-1.	Video obtenido con spot de 1000 W.....	45
Figura 7-2.	Imagen capturada utilizando la fuente de luz de arco Xenón.....	47
Figura 7-3.	Curva de calibración para el sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad.....	47
Figura 7-4.	Esfera de 200 μm capturada por videoendoscopía.....	48
Figura 7-5.	Imágenes obtenidas con el sistema de videoendoscopía acoplado a la fuente de luz Xenón. P/V 0.25 kW/m ³ , 5% v/v, 0.25 vvm, 5 minutos de agitación (a) Sistema líquido-líquido (b) Sistema líquido-gas (c) Sistema trifásico.....	50

Figura 7-6.	Distribución de diámetros de burbujas de las tres configuraciones evaluadas.	52
Figura 7-7.	Reproducibilidad de la medición de la distribución de diámetros de gotas de aceite en sistema trifásico. Posición A.....	53
Figura 7-8.	Reproducibilidad de la medición de diámetros de gotas de aceite en sistema trifásico. Posición B.....	54
Figura 7-9.	Reproducibilidad de la medición de la distribución de diámetros de burbujas en sistema trifásico. Posición A	55
Figura 7-10.	Reproducibilidad de la medición de la distribución de diámetros de burbujas en sistema trifásico. Posición B	55
Figura 7-11.	Distribución de (I) diámetros de gotas de aceite, sistema líquido - líquido, $P=0.25\text{kW/m}^3$, 5% v/v aceite. (II). Diámetros de burbujas de aire, sistema líquido – gas.....	58
Figura 7-12.	Diámetros Sauter (μm) de gotas de aceite, obtenidos en el sistema líquido - líquido. $P: 0.25\text{kW/m}^3$, 5% v/v aceite.. ..	59
Figura 7-13.	Diámetros Sauter (μm) de burbujas de aire, obtenidos en el sistema líquido – gas. $P: 0.25 \text{ kW/m}^3$. Velocidad de flujo de gas 0.25 vvm.....	60
Figura 7-14.	Diámetros Sauter (μm), de gotas y burbujas, obtenidos en el sistema trifásico en diferentes zonas dentro del tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm, 5% v/v de aceite. Izquierda, d_{32} de gotas. Derecha, d_{32} de burbujas.....	63
Figura 7-15.	Distribución de diámetros de gotas en un sistema trifásico en función de la posición espacial dentro de un tanque de mezclado. $P=0,25 \text{ kW/m}^3$, 0,25 vvm, 5% v/v de aceite.....	65
Figura 7-16.	Distribución de diámetros de burbujas de aire en un sistema trifásico en función de la posición espacial dentro de un tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm, 5% v/v de aceite.....	65
Figura 7-17.	Gráfico de dispersión de energía en un tanque agitado m^2s^{-3} (Ng y Yianneskis, 2000).	67
Figura 7-18.	Izquierda: Contornos de <i>turbulent length scale</i> calculada (m); Derecha: Contorno de diámetros de burbujas entre dos baffles (m) (Kerdouss et al., 2005).....	67
Figura 7-19.	Distribución de gotas de aceite en un sistema de dos y tres fases en diversas zonas dentro de un tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm, 5% v/v de aceite	70
Figura 7-20.	Distribución de burbujas de aire en un sistema de dos y tres fases en diversas zonas dentro de un tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm, 5% v/v de aceite.	71

NOMENCLATURA

Unidades

Símbolo	Definición
°	Grados
°C	Grados centígrados
g	Gramos
kg _f	Kilogramos fuerza
L	Litro
m	Metro
min	Minuto
N	Newton
Pa	Pascal
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo
vvm	Volumen de aire por volumen de trabajo por minuto
W	Watt

Prefijos

Símbolo	Definición
k	Kilo
c	Centi
m	Mili
μ	Micro

SIMBOLOGÍA

Símbolo	Definición	Unidades
B	Longitud del brazo de palanca	m
D	Diámetro del impulsor	m
d_{32}	Diámetro Sauter	μm
d_i	Diámetro de una gota o una burbuja	μm
F	Fuerza	kg_f
FR	Frecuencia relativa	unidades
H	Altura del tanque de mezclado	m
H_L	Altura del líquido en el tanque de mezclado	m
N	Velocidad de agitación	rpm
n_i	número de objetos con un diámetro d_i	unidades
P	Potencia	kW
P/V	Potencia volumétrica	kW/m^3
P_g	Potencia gaseada	kW/m^3
P_o	Número de potencia	adimensional
r	Coordenada cilíndrica radial	m
Re	Número de Reynolds	adimensional
T	Diámetro interno del tanque de mezclado	m
V	Volumen del tanque de mezclado	m^3
v/v	Porcentaje de volumen entre las fases	%
v_t	Fracción de volumen de gas	%
z	Coordenada radial vertical	m
α	Nivel de significancia estadística	%
γ	Viscosidad cinemática	m^2/s
θ	Coordenada cilíndrica acimutal (angular)	°
μ	Viscosidad	Pa s
ρ	Densidad	kg/m^3
ρ_c	Densidad de la fase continua	kg/m^3
σ	Tensión superficial	N/m
ω	Velocidad angular	s^{-1}

RESUMEN

En muchas industrias como la bioquímica, algunos de los procesos involucran dispersiones multifásicas donde se utiliza el mezclado para la dispersión y homogenización de las fases. El mezclado entre las distintas fases involucradas es de vital importancia para la transferencia de masa en el sistema que a su vez permite satisfacer los requerimientos nutricionales del microorganismo y/o la síntesis de los compuestos de interés.

Por medio del análisis de imágenes, se ha logrado evaluar la dispersión de gases y líquidos inmiscibles involucrados en los procesos de fermentación. Sin embargo, sólo se han estudiado las zonas de mezclado cercanas a la pared de los tanques de mezclado. El objetivo de esta tesis fue caracterizar la dispersión de gotas de aceite y burbujas de aire en sistemas, líquido - gas, líquido - líquido y líquido - líquido - gas, en diferentes sitios dentro de un tanque de mezclado de nivel laboratorio.

Se implementó un sistema de videoendoscopía de alta velocidad, el cual se compone de un endoscopio acoplado a una cámara de alta velocidad, encontrando las condiciones de operación necesarias para obtener videos con la calidad requerida para llevar a cabo el análisis de imágenes. Se obtuvieron videos de dos medios bifásicos (líquido - líquido y líquido - gas) y uno trifásico (líquido - líquido - gas) en cinco diferentes zonas de un tanque de mezclado de 6.7 L, el cual está equipado con un sistema mecánico de agitación, constituido por una turbina Rushton 0.5 T, es operado a una potencia volumétrica de 0.25 kW/m^3 . En los medios que involucran una fase gaseosa, se suministró aire a 0.25 vvm y en los medios que involucran una fase líquida inmiscible se adicionó 5 % (v/v) de aceite de ricino.

Los videos fueron analizados por medio de un *software* comercial, midiendo los diámetros de las gotas de aceite y burbujas de aire. Con estos datos se calculó el diámetro Sauter y se graficaron las distribuciones de diámetros. Los análisis se llevaron a cabo por duplicado y se encontró una alta reproducibilidad al aplicar la prueba de comparación de distribuciones Tukey-Kramer ($\alpha = 0.05$).

Los resultados muestran que existe diferencia estadísticamente significativa entre los diámetros de burbujas y gotas en las distintas zonas del tanque de mezclado ($\alpha = 0.05$), siendo la zona cercana al impulsor del tanque de mezclado la que presenta menores tamaños de gotas y burbujas con respecto a las otras zonas del tanque de mezclado, indicando una mayor disipación de energía generada por la turbina.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de fermentación son de gran relevancia dentro de diversas aplicaciones industriales donde la dispersión de las fases juega un papel importante ya que determina la eficiencia de la transferencia de masa. Una forma de evaluar dicha eficiencia es mediante la evaluación de los tamaños de las estructuras que se forman de las distintas fases (gotas de aceite y burbujas de aire) y su dispersión dentro del tanque de mezclado, mediante análisis de imágenes.

El grupo de investigación del Doctor Enrique Galindo del Instituto de Biotecnología de la UNAM ha estudiado la dispersión en sistemas multifásicos, tomando como modelo de estudio la fermentación de *Trichoderma harzianum* para la producción de aromas, utilizando técnicas avanzadas de análisis de imágenes (Galindo *et al.*, 2000; Brito-Albavera 2001; Taboada *et al.*, 2002; Galindo *et al.*, 2005; Guevara 2008). Por medio del análisis de imágenes, se ha podido obtener información sobre la distribución de diámetros gotas de aceite y burbujas de aire, además de obtener información sobre el área interfacial y la transferencia de masa de este proceso multifásico (Galindo *et al.*, 2005).

Se ha evaluado, en un sistema modelo, diferentes condiciones del cultivo de *T. harzianum*. Sin embargo, sólo se ha podido caracterizar la zona cercana a la pared del tanque de mezclado (<1 cm de la pared) (Guevara, 2008, Galindo *et al.*, 2000) debido principalmente a la profundidad de campo que presentan las técnicas de análisis de imágenes y a la concentración de las fases que no permiten enfocar claramente los objetos que se encuentran dentro del tanque de mezclado en zonas lejanas a la pared del tanque. Otros estudios se han enfocado en el análisis del proceso utilizando estimaciones matemáticas y herramientas como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para predecir distribuciones y comportamiento de las fases dentro de los tanques (Angeli y Hewitt, 2000; Alves *et al.*, 2002; Venneker *et al.*, 2002; Laakkonen *et al.*, 2005 a y b; Laakkonen *et al.*, 2007). Estos estudios han reportado que la distribución de tamaños de gotas y/o

burbujas difiere a lo largo de las zonas del tanque, siendo más pequeñas en las zonas más cercanas al impulsor, debido a una mayor cantidad de energía disipada en la zona (Kerdouss *et al.*, 2005). Por otra parte, en nuestro grupo de investigación se obtuvieron previamente imágenes de zonas alejadas de la pared, mediante la técnica de videoendoscopía acoplada a una cámara de alta velocidad (Taboada *et al.*, 2006). Sin embargo, no se documentó el lugar exacto en que se llevó a cabo el análisis.

Por otra parte, se han realizado estudios del efecto que produce una segunda fase inmisible (aceite) sobre una dispersión líquido–gas (Galindo *et al.*, 2000; Lucatero *et al.*, 2003). Sin embargo, no se consideró el efecto de la hidrodinámica en distintas zonas del tanque de mezclado. Por ello, la obtención de imágenes en diferentes zonas dentro del tanque, alejadas de la pared y conociendo en detalle la posición espacial donde se capturan las imágenes, permitirá evaluar las diferencias en la dispersión de aire y aceite en distintas zonas del tanque. Asimismo, se puede estudiar el efecto producido por la presencia de una segunda fase inmisible sobre la dispersión de aire en las distintas zonas del tanque de mezclado.

En este trabajo se implementó, calibró y evaluó un sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad. Se esta forma se determinó experimentalmente la dispersión en dos sistemas modelo bifásicos (medio salino, aire y medio salino, aceite) y en uno trifásico (medio salino, aceite, aire) en cinco diferentes zonas dentro del tanque de mezclado.

2. JUSTIFICACIÓN

En el grupo de investigación del Doctor Enrique Galindo, del Instituto de Biotecnología de la UNAM, se ha estudiado la dispersión en sistemas multifásicos, utilizando técnicas avanzadas de análisis de imágenes (Galindo *et al.*, 2000; Brito-Albavera 2001; Taboada *et al.*, 2002; Galindo *et al.*, 2005; Guevara 2008). Estos trabajos incluyen sistemas de dos, tres y cuatro fases, donde se ha evaluado la dispersión de las fases sólo en zonas cercanas a la pared del tanque (Galindo *et al.*, 2000; Galindo *et al.*, 2005; Guevara, 2008).

En la literatura se ha reportado que la mayor cantidad de energía dentro de un tanque agitado mecánicamente, es disipada en la zona cercana al impulsor (Ng y Yianneskis, 2000; Zhou y Kresta, 1996) y que en estas zonas es donde ocurre principalmente el rompimiento de las gotas de aceite y las burbujas de aire (Zhou y Kresta, 1998a).

Diferentes trabajos han reportado los gradientes de energía disipada, velocidad de partículas, *hold up* de gas, distribuciones de diámetros y diámetro Sauter de gotas y burbujas, en diferentes zonas de tanques de mezclado (Laakkonen *et al.*, 2005a y c). Sin embargo, en ninguno de estos trabajos se involucra más de dos fases o se llevaron a cabo evaluaciones experimentales, es decir estas evaluaciones fueron por medio de simulaciones computacionales (*Computational Fluids Dynamics*, CFD).

De esta forma, en este trabajo se propuso realizar un estudio experimental que incluyó realizar mediciones en cinco diferentes posiciones dentro del tanque agitado, con un sistema trifásico, lo cual permitió evaluar en detalle, el comportamiento de un proceso multifásico mediante la técnica de videoendoscopía acoplada a una cámara de alta velocidad.

3. ANTECEDENTES

3.1. Dispersiones

En los procesos industriales en los que se utilizan fermentaciones, se involucra la dispersión de al menos dos fases, ya que se debe proveer a los microorganismos (sólidos) un medio de cultivo rico en nutrientes que les proporcione el ambiente necesario para su desarrollo. En este tipo de sistemas se requiere dispersar el aire que transporta el oxígeno dentro del medio de cultivo. Debido a la baja solubilidad del oxígeno en agua, el suministro y dispersión del mismo debe realizarse de manera continua para que el oxígeno no limite el proceso de fermentación. En algunos procesos de fermentación se requiere además emplear aceites como fuente de carbono, principal o secundaria. Debido a que los aceites son inmiscibles en agua, es necesario dispersarlos en el medio a fin de suministrar al microorganismo los nutrientes necesarios para su crecimiento. La dispersión tiene como finalidad incrementar el área y por consiguiente, la velocidad de transferencia de masa, lo que para muchos procesos determina la productividad (Cents *et al.*, 2004). Por lo anterior, se requiere que las gotas de aceite y burbujas de aire sean lo más pequeñas posibles, debido a que esto permite obtener una mayor relación área superficial/volumen.

3.2. Dispersiones multifásicas

La mayoría de las fermentaciones involucran sistemas multifásicos en los que es necesario dispersar al mismo tiempo gases y líquidos inmiscibles (fermentaciones trifásicas) o en casos más complejos, gases, líquidos inmiscibles y sólidos (fermentaciones tetrafásicas).

Los procesos de fermentación multifásicos son de gran relevancia por la diversidad de sus campos de aplicación (industriales, ambientales, minerales, geofísicos, petroquímica, etc.). Las dispersiones de gotas y burbujas que ocurren en estos procesos son altamente complejas y, por lo tanto, difíciles de caracterizar. Tal es el caso, por ejemplo, de los procesos fermentativos que utilizan hongos filamentosos (Serrano-Carreón *et al.*, 1997). En estos procesos se

requiere una alta eficiencia en el transporte de nutrientes (oxígeno y ácidos grasos) al microorganismo, la cual está determinada por la dispersión de aire y de aceite en el sistema, que a su vez está controlado por la energía transmitida al sistema a través de agitación mecánica. La dispersión puede ser evaluada conociendo el tamaño de los elementos dispersos. Es importante conocer de manera detallada el tamaño de las gotas de aceite y burbujas de aire formadas durante el mezclado ya que en buena medida determinan la eficiencia y productividad de la fermentación.

3.3. Dispersión bifásica líquido – gas

En los sistemas de producción que involucran microorganismos es de vital importancia el suministro de la fase gaseosa en el medio de cultivo, ya sea para eliminar el oxígeno en procesos anaerobios o para suministrar oxígeno, en procesos aerobios. En estos procesos aerobios, la transferencia de oxígeno al microorganismo tiene lugar a través de la interface gas-líquido, la cual es dependiente del área de transferencia disponible entre las fases. Esta área está dada por las características de las burbujas de aire en el sistema, como son, el número y el diámetro de las burbujas. Las características de las burbujas son determinadas y pueden ser controladas a través de variables como la geometría del tanque de mezclado, la geometría del impulsor, la velocidad de agitación, el flujo de gases, las propiedades hidrodinámicas de la fase continua, así como su reología (Tatterson *et al.*, 1991). Debido a la baja solubilidad de aire en el agua, el paso limitante en el suministro de nutrientes está dado en la difusión del oxígeno; por ello, para obtener una mayor área de contacto se requiere la manipulación de las condiciones de operación para lograr burbujas de menor tamaño, las cuales tienen globalmente una mayor relación área superficial/volumen.

Mientras se lleva a cabo el proceso de agitación, se presentan fenómenos relevantes para la transferencia, como son el rompimiento de las burbujas en las zonas de mayor energía disipada y que presentan mayor gradiente de deformación dentro del tanque, y la coalescencia de burbujas, el cual se presenta en zonas del tanque a las que se les entrega una menor energía. Estos

fenómenos, junto con los mecanismos de dispersión, que pueden alterar las propiedades del medio, modifican drásticamente el proceso, alterando la distribución y diámetros de las burbujas presentes y disminuyendo por tanto la transferencia de gases.

3.4. Dispersión bifásica líquido–líquido

Dentro de los procesos de producción industrial más utilizados podemos encontrar el mezclado de líquidos inmiscibles mediante el uso de tanques agitados mecánicamente. Con esta operación se logra dispersar pequeñas gotas de la fase inmiscible en el medio acuoso. La agitación dentro del tanque promueve una mejor transferencia de masa a través de la interface líquido–líquido al disminuir el tamaño de las gotas y debido a esto obtener un aumento en el área de transferencia.

La distribución de tamaños de gotas presente en el sistema está determinada por un equilibrio dinámico entre la ruptura y coalescencia de las gotas que existe en la dispersión y es una de las características más importantes en dispersiones líquido–líquido (Zhou y Kresta, 1998b). Cuando en un proceso de mezclado se aumenta la velocidad de agitación se crean gradientes de energía entregada al sistema o energía disipada en el sistema, en las distintas zonas del tanque de mezclado. Estos gradientes alteran la hidrodinámica del fluido que tiende a deformar gotas dispersas en el medio. Cuando las fuerzas hidrodinámicas que deforman las gotas de líquido inmiscible presentes son mayores a las fuerzas de tensión superficial de la gota, se presenta entonces el rompimiento de las gotas (Pacek *et al.*, 1998).

El tamaño promedio y la distribución de tamaños de gotas dependerá de la geometría del sistema, de las condiciones de energía suministrada, de la fracción de volumen de la fase dispersa y de las propiedades físicas de ambos líquidos (viscosidad, tensión superficial, hidrofobicidad) (Zhou y Kresta 1998a), así como de la influencia de terceras especies, tal como partículas sólidas y de las propiedades físicas de éstas. En estos sistemas la presencia de agentes externos o agentes presentes durante el proceso pueden afectar la distribución de tamaños

de gotas como pueden ser agentes surfactantes, electrolitos, agentes miceliales, así como cambios en las propiedades reológicas de la fase continua.

3.5. Dispersión trifásica líquido – líquido – gas

En muchos procesos biotecnológicos, el transporte de oxígeno a través de un medio acuoso y una fase orgánica insoluble es de vital importancia para dicho proceso. La adición de una fase orgánica, como son aceites, se lleva a cabo para cumplir con objetivos específicos como pueden ser: mejorar la transferencia de oxígeno al utilizar la fase orgánica como un vector, como una fuente de carbono principal o secundaria que permite la producción de compuestos específicos, para la protección de cepas mutantes frágiles, para extraer del medio de cultivo metabolitos de alto valor agregado o que resultan inhibidores del crecimiento del microorganismo productor (Galindo *et al.*, 2000).

Se han realizado diversos estudios que intentan explicar el efecto de una fase orgánica insoluble en la transferencia de oxígeno en un medio líquido – líquido. Sin embargo, los resultados obtenidos son contradictorios en cuanto al efecto producido (Dumont y Delmas, 2003). Galindo *et al.*, (2000) reportaron que al agregar aceite de ricino a un medio líquido – gas, el tamaño de las burbujas presentes dentro de un tanque agitado disminuye. Asimismo, al aumentar la concentración de aceite, el diámetro de las burbujas disminuye, aumentando el área de transferencia. En 2008, Clarke y Correia reportaron que el efecto positivo o negativo de la fase orgánica sobre la transferencia de oxígeno depende de la naturaleza de la misma y su concentración, así como del diseño del reactor y las condiciones de operación.

3.6. Caracterización de dispersiones

Existen diversos estudios realizados para caracterizar las dispersiones de distintos sistemas utilizando sistemas de dos, tres y hasta cuatro fases, (líquido – líquido; líquido – gas; líquido – líquido – gas; líquido – gas – líquido – sólido) utilizando diversas técnicas como son: imagen digital, anemometría láser, succión capilar, etc. Sin embargo, en estos estudios se ha utilizado la medición de objetos (gotas de aceite y burbujas de aire) que se generan en el sistema, ya que éstos

determinan el área interfacial disponible para la transferencia de masa. La información requerida acerca de la calidad de las dispersiones se puede obtener a través del diámetro promedio, ya que considera el diámetro de burbujas o gotas del conjunto y el número de objetos que integran dicho conjunto de datos (Córdova-Aguilar, 2003). El diámetro Sauter (d_{32}), es el diámetro promedio más utilizado ya que relaciona el volumen con el área de la fase dispersa (Pacek *et al.*, 1998). El diámetro Sauter se define como:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3 n_i}{\sum_{i=1}^n d_i^2 n_i} \quad \text{Ec 1}$$

Donde d_i es el diámetro de la gota o burbuja y n_i es el número de objetos con dicho diámetro.

Zhou y Kresta (1998a) mencionan que se debe realizar, adicionalmente al cálculo del diámetro Sauter, una cuantificación de la distribución de diámetros de gotas y/o burbujas en el sistema en estudio, debido a que se puede obtener un mismo valor de d_{32} para dispersiones con distintas distribuciones de tamaño. La evaluación de la distribución de tamaños puede realizarse en función de la densidad de frecuencias o del volumen acumulado, lo que se hace a través de una tabla de frecuencias y su histograma. Las frecuencias se obtienen clasificando los tamaños de gotas y burbujas en intervalos establecidos. Al presentar los datos en forma de distribución acumulada de volumen puede observarse la importancia de cada partícula y cómo se distribuye el volumen total de la fase dispersa en un eje de tamaños de gotas o burbujas (Ramkrishna *et al.*, 1995).

Existen correlaciones que estiman el d_{32} con respecto a la potencia volumétrica a partir de propiedades físicas de los fluidos, condiciones de operación y parámetros geométricos del biorreactor e impulsor. Sin embargo, la mayor parte de estas ecuaciones sólo son válidas cuando la fase dispersa está muy diluida (0.03 %) (Zhou y Kresta, 1998a). Entre las más conocidas está la ecuación de Calderbank, para reactores agitados por turbinas Rushton (Laakkonen *et al.*, 2005b):

$$d_{32} = 4.15 \left[\frac{\sigma^{0.6}}{P_g / V^{0.4} \rho_c^{0.2}} \right] v_t^{0.5} + 0.0009 \quad \text{Ec 2}$$

Donde: σ es la tensión superficial (N/m), P_g es la potencia gaseada de mezclado (W), V es el volumen del reactor (m^3), ρ_c es la densidad de la fase continua (kg/m^3) y v_t es la fracción volumen de gas.

En la literatura, se han reportado valores de diámetro Sauter que oscilan entre 400 y 2000 μm para las gotas de aceite y entre 800 y 2500 μm para las burbujas de aire, dependiendo de las condiciones de operación (potencia volumétrica, velocidad de agitación) y las concentraciones de la fase dispersa. (Galindo *et al.*, 2000; Galindo *et al.*, 2005; Lucatero *et al.*, 2003; Brito-Albavera 2001; Guevara 2008).

3.6.1. Potencia

Para realizar una correcta caracterización de las dispersiones, se debe tomar en cuenta el desempeño del sistema de agitación dentro del tanque de mezclado. Éste puede ser evaluado mediante la medición de la potencia (P) que está definida como la cantidad de energía necesaria, en un período de tiempo, para generar el movimiento del fluido dentro del biorreactor, generalmente realizado por agitación mecánica a través de impulsores (Ascanio *et al.*, 2004). La potencia está influenciada por las características reológicas del cultivo, así como las condiciones de operación, las características geométricas del tanque y el diseño del impulsor (Córdova-Aguilar, 2003).

Se sabe que la potencia que se disipa en el fluido en un tanque agitado, dentro de un proceso de fermentación, es la única porción de la potencia suministrada que tiene efecto en el proceso (Galindo, 1996).

La potencia en sistemas sin aeración depende de la velocidad de agitación a la tercera potencia ($P \propto N^3$), así como a la quinta potencia del diámetro del impulsor ($P \propto D^5$). Para poder realizar el cálculo de la potencia en el sistema, se debe tomar en cuenta el número de Reynolds (Re), el cual engloba las características del fluido, así como las características del sistema de agitación.

$$\text{Re} = \frac{N * \rho * D^2}{\mu} \quad \text{Ec 3}$$

El número de potencia (Po) nos permite relacionar la tensión del sistema de agitación con las variables que representan el esfuerzo de inercia, es decir, relaciona las propiedades del medio agitado con las propiedades mecánicas del sistema de agitación.

$$Po = \frac{P}{\rho * N^3 * D^5} \quad \text{Ec 4}$$

En la literatura se pueden encontrar curvas de Po vs Re para fluidos Newtonianos y no-Newtonianos, para diferentes geometrías de impulsores. Conociendo las características del fluido y en los impulsores utilizados, se puede conocer la potencia suministrada al sistema. Se debe tomar en cuenta, al realizar el cálculo de potencia (aparte de la geometría de los impulsores), la configuración en que son colocados los impulsores en caso de utilizar más de uno (usualmente se utilizan tres impulsores).

Para fluidos de baja viscosidad, espaciando los impulsores a una distancia equivalente a un diámetro del tanque, la potencia aplicada es máxima en vista de que los patrones de flujo en ambos impulsores prácticamente no interactúan entre sí. Si esto ocurre, la potencia total consumida por el sistema es simplemente el consumo de un impulsor, multiplicado por el número de impulsores (Galindo, 1996).

3.7. Técnicas para la caracterización de dispersiones

Se han desarrollado diversas técnicas que permiten el análisis de las dispersiones multifásicas, estos análisis consisten principalmente en la determinación de los diámetros de gotas y burbujas, así como de su distribución, con la finalidad de obtener información acerca del área de transferencia de los medios inmiscibles. Existen diversos trabajos publicados, los cuales explotan las ventajas de cada una de estas técnicas. A continuación se mencionarán algunas de las más conocidas.

3.7.1. Sonda de succión capilar

La técnica de succión capilar es una prueba invasiva que consiste en succionar muestra de la dispersión a través de un capilar de vidrio conectado a una bomba de vacío. La dispersión dentro del capilar se transforma en una forma cilíndrica de volumen equivalente, en el cual puede calcularse el volumen de las fases. Asimismo, se puede adaptar un sensor sensible a la luz, el cual permite registrar el número de objetos presentes, la velocidad y el volumen de las fases. Una de las ventajas de esta técnica es que puede ser empleada en dispersiones opacas y con elevados coeficientes de retención de gas. Su principal desventaja es ser una técnica invasiva que altera la hidrodinámica del proceso y por lo tanto no puede aplicarse en pequeños volúmenes, debido a la necesidad de volúmenes de muestra relativamente altos que resulten representativos.

La sonda de succión capilar sólo funciona para intervalos de diámetros preestablecidos y no permite un muestreo de diámetros de diferentes órdenes de magnitud, ya que si es más pequeño el diámetro de las burbujas que el del capilar las burbujas coalescerán en el interior del capilar y ocasionarán errores. Por otra parte, si el diámetro es muy grande, las burbujas podrían romperse en la entrada de la sonda, ocasionando errores en la medición. En general, los diámetros que pueden ser medidos están en orden de milímetros (Laakkonen *et al.*, 2005a y b).

Algunos estudios de distribución de diámetros de burbujas en sistemas líquido gas fueron realizados utilizando sondas de succión capilar (Greaves y Kobbacy, 1984, Barigou y Greaves, 1991, 1992a, 1992b y Alves *et al.*, 2002). Barigou y Greaves (1991) desarrollaron un sistema de succión capilar automatizado con el que se obtuvo alta reproducibilidad en las mediciones para diámetros menores a 0.33 mm.

3.7.2. Sistemas láser

Las técnicas que se basan en la utilización de láseres para la caracterización de dispersiones han sido ampliamente utilizadas y reportadas. Con ellas se puede investigar la velocidad de las partículas, la fracción de gas retenida, los patrones

de flujo y el tamaño de partículas. Algunas de las técnicas que emplean láser se explicarán en este apartado.

3.7.2.1 Anemometría láser

La anemometría láser o anemometría de fase Doppler es una técnica no invasiva que se aplica para la medición de los diámetros de burbujas o gotas, la distribución de tamaños y la velocidad de los mismos en sistemas multifásicos que involucran una fase orgánica. Algunos de los trabajos realizados usando esta técnica se reportan en: Müdde *et al.*, (1997); Schäfer *et al.*, (2000); Kulkarni *et al.*, (2001).

Esta técnica consiste en el uso de dos rayos láser, los cuales son dirigidos al sistema para hacerlos converger en la zona de estudio en la que se encuentran las burbujas y gotas que se desea analizar. Cuando una burbuja o gota pasa a través del plano formado por los rayos, el detector recibe la señal y detecta el cambio entre ambos rayos, con lo que se determina el diámetro del objeto. La desventaja de la técnica es que requiere de dispersiones y tanques transparentes (Laakkonen *et al.*, 2005c), además de no poder distinguir entre gotas y burbujas.

La aplicación de esta técnica está limitada a sistemas con fases dispersas muy diluidas (Maab *et al.*, 2007); además, la precisión de las mediciones dependerá de la esfericidad de las burbujas, debido a que la medición depende de la curvatura de la superficie de las burbujas (Laakkonen *et al.*, 2005c).

Esta técnica también ha sido empleada para determinar velocidades del fluido en las diferentes zonas del reactor. Schäfer *et al.*, (1998) emplearon un sistema de anemometría láser para determinar la velocidad del fluido en un reactor agitado con un impulsor de paletas inclinadas, para un fluido con viscosidad de 0.00159 Pa.s, reportando los patrones de flujo y la turbulencia producida por el sistema de agitación analizado, donde se observa que la energía se disipa dentro de los vórtices mientras que en otras zonas de mezclado resultan menores en varios órdenes de magnitud.

3.7.3. Velocimetría de imágenes de partículas

Esta técnica emplea una cámara, un rayo láser y un sistema de análisis de imágenes (Chaouki *et al.*, 1997). La velocimetría de imágenes de partículas (PIV), es una técnica que provee información de los componentes de flujo en sistemas multifásicos.

La aplicación de esta técnica se limita a dispersiones transparentes (Chaouki *et al.*, 1997). Laakkonen *et al.*, (2005c) emplearon esta técnica en el análisis de dispersiones gas-líquido, para determinar diámetros de burbujas de acuerdo a la posición dentro del tanque, encontrando que en las zonas cercanas al impulsor se encuentran los objetos con menor diámetro, mientras que en las zonas cercanas a la pared del tanque se encuentran objetos de mayor tamaño, atribuyendo esto a una mayor coalescencia debida a la menor disipación de energía en esta zona.

Escudíe y Liné (2003) utilizaron un sistema PIV para medir patrones de flujo en un tanque agitado con turbina Rushton, reportando valores de alrededor de 80 % de la velocidad en la punta del impulsor, en zonas cercanas a la descarga del mismo.

3.7.4. Análisis de imágenes

La técnica de análisis de imágenes es un conjunto de métodos que pueden ser utilizados para realizar mediciones de los diámetros de gotas de aceite y burbujas de gas en sistemas multifásicos. El análisis de imágenes involucra cámaras fotográficas o de video convencionales, con las que se adquieren evidencias visuales de las burbujas de gas y/o gotas de líquido que se forman dentro del mezclador (tanque agitado o columna de burbujeo). Estos objetos son identificados y clasificados mediante un pre procesamiento para después ser medidos con ayuda de *software* comerciales. Las mediciones obtenidas son ordenadas en una hoja de cálculo y analizadas de acuerdo a su diámetro promedio y la distribución de diámetros. Este tipo de análisis tienen la gran ventaja de no ser invasivas, es decir, no perturban el sistema al no ser necesario obtener una muestra del sistema.

Durante los últimos diez años, el empleo de este tipo de técnicas se ha incrementado debido al desarrollo de cámaras digitales, láser y sistemas para el procesamiento automático de imágenes, que hacen las mediciones más sencillas (Lakkonen *et al.*, 2005c). Sin embargo, las técnicas de análisis de imágenes tiene desventajas que han causado controversia entre los grupos de estudio del tema y han sido objeto de comparación en trabajos publicados (Lakkonen *et al.*, 2007). Entre las principales desventajas que presenta este tipo de análisis está que las fotografías obtenidas no suelen ser claras, presentan distorsión de los objetos y el análisis manual de dichas fotografías es tedioso y costoso. Además, la mayor parte de los algoritmos de computación empleados en el análisis de imágenes para ahorrar tiempo de segmentación manual, no son flexibles y son poco aplicables en la evaluación de dispersiones complejas (Lakkonen *et al.*, 2005a).

El sistema de análisis de imágenes que involucra cámaras convencionales tiene la dificultad de adquirir imágenes en movimiento lo suficientemente claras para poder discernir y caracterizar todos los elementos presentes en la dispersión. Por lo que se han desarrollado sistemas para la adquisición de imágenes empleando cámaras de video convencional acoplada a aditamentos que permiten resolver problemas de claridad y enfoque de los objetos presentes en los sistemas de dispersión (Taboada *et al.*, 2003; Galindo *et al.*, 2005). Estos sistemas de adquisición de imágenes han hecho posible la obtención de imágenes en línea de la dispersión en el interior de taques de mezclado. Sin embargo, pueden analizar sistemas de agitación operados a potencias bajas ($<0.2 \text{ kW/m}^3$) y con fases dispersas menores a 2% v/v.

3.7.5. Video de alta velocidad

Cuando los objetos a analizar se mueven a una velocidad mayor a la de barrido de la cámara, resultan imágenes movidas o difusas (Brito-Albavera, 2001). El desarrollo de técnicas de iluminación avanzadas y de cámaras de video de alta velocidad ha permitido la determinación de tamaños de partículas (en el orden de μm) en dispersiones multifásicas (Tayali y Bates, 1990). En los últimos años se ha optado por utilizar cámaras de video de alta velocidad, que permiten obtener

imágenes para la medición en dispersiones líquido - líquido, en condiciones que una cámara de video convencional no lo permitiría (Lovick *et al.*, 2005).

En 2008 se publicó un estudio sobre el efecto del tipo de impulsor (Rushton y Smith) y la presencia de proteína animal (agente tensoactivo) sobre la dispersión de aceite y aire en un sistema trifásico líquido – líquido – gas utilizando potencias volumétricas de 0.20 y 0.50 kW/m³, aireación de 0.25 vvm y 5 % de fase dispersa, analizados mediante cámaras de video de alta velocidad donde se lograron obtener imágenes nítidas de las gotas de aceite y las burbujas de gas (Guevara, 2008). Sin embargo, las mediciones se realizaron en la zona cercana a la pared del tanque (~ 1 cm) donde se sabe que la energía disipada es menor en comparación con las zonas cercanas al impulsor del tanque de mezclado (Ng y Yianneskis, 2000; Kerdouss *et al.*, 2005).

El análisis de imágenes utilizando cámaras de alta velocidad permite analizar objetos que se mueven a velocidades altas, producidas por potencias de hasta 0.5 kW/m³ y concentraciones de fase dispersa de 5 % v/v. Sin embargo, no permite la adquisición de imágenes en zonas alejadas de la pared del tanque, debido principalmente a la concentración de burbujas de gas y de gotas de aceite que obstruyen la visibilidad de los objetos que se encuentran en las zonas de mayor disipación de energía.

3.7.6. Video endoscopía de alta velocidad

Debido a la limitante de obtener imágenes de dispersiones en zonas alejadas de la pared del tanque de mezclado que presenta la técnica de análisis de imágenes utilizando una cámara de video de alta velocidad, se han desarrollado técnicas de adquisición de imágenes que incluyen la adaptación de endoscopios al sistema, lo que ha hecho posible obtener fotografías y videos de objetos en movimiento en otras partes del fermentador y no sólo en las zonas cercanas a la pared. Taboada *et al.* (2006) desarrollaron un sistema de videoendoscopía, el cual incluye una cámara de video de alta velocidad. La cámara está acoplada a un endoscopio, al cual se le acopló una luz directa de arco Xenón, transmitida al tanque por medio de una guía de luz de fibra óptica. La cámara con el endoscopio

y la luz fueron colocadas en un tripié para facilitar su manejo en las diferentes zonas del tanque. El arreglo del sistema se muestra en la Figura 3.7.6-1. Con este sistema fue posible obtener imágenes nítidas de burbujas de aire y gotas de aceite en un sistema líquido – líquido – gas. Sin embargo, no se registraron los sitios en los que se realizó el análisis ni se realizó una comparación entre las diferentes zonas dentro del tanque de mezclado.

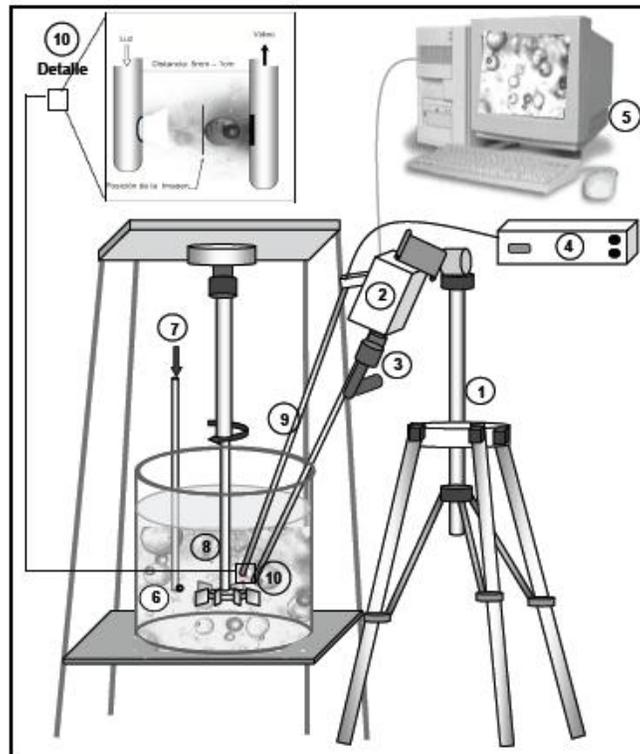


Figura 3.7.6-1. Diagrama del sistema de endoscopia de alta velocidad. 1) Tripié. 2) Cámara de alta velocidad. 3) Endoscopio. 4) Luz arco Xenón. 5) Computadora. 6) Tanque de mezclado. 7) Difusor de aire. 8) Turbina Rushton. 9) Guía de luz de fibra óptica 10) Detalle que muestra la distancia y posición que debe tener la luz del endoscopio.

3.8. Estudios de caracterización de tanques de mezclado

En la literatura existen diferentes análisis realizados mediante dinámica de fluidos computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Esta técnica nos permite obtener predicciones de diámetros de burbujas y gotas dentro de tanques de mezclado bajo diferentes condiciones de operación. Estos estudios necesitan ser comprobados experimentalmente por varias técnicas (Laakkonen, 2005a). Estas

técnicas incluyen análisis de imágenes, anemometría láser, succión capilar, tomografía electrónica, entre otras.

Los datos generados en trabajos previos no resultan muy útiles para este fin, ya que fueron generados solamente en una zona poco representativa del tanque de mezclado, como se mencionó anteriormente. Existen trabajos previos en los que se realizó un estudio detallado de los objetos en dispersión dentro de un tanque de mezclado en distintas zonas del mismo y utilizando diversas técnicas de análisis de imágenes (Laakkonen *et al.*, 2005a; Laakkonen *et al.*, 2005b; Laakkonen *et al.*, 2005c). Sin embargo, estos estudios sólo se han realizado utilizando medios bifásicos (líquido – gas). El presente trabajo dará información relevante que ayude al entendimiento de los fenómenos de mezclado y transferencia de masa en dos medios bifásicos (líquido – líquido y líquido – gas) y un medio trifásico (líquido – líquido – gas).

3.9. Antecedentes directos

Se han realizado diversos trabajos que estudian la dispersión en diversos puntos de tanques agitados en medios multifásicos. Galindo *et al.*, (2000) utilizaron un medio salino y estudiaron la dispersión de aire y aceite de ricino en un tanque agitado mediante el uso de una técnica fotográfica. Se encontró que la presencia del aceite de ricino mejora la dispersión de aire dentro del tanque. Sin embargo, al igual que Lucatero *et al.* (2003) y Nienow *et al.* (1998) se reportó que la aireación no ayuda con en la dispersión de aceite, debido a que causa un incremento en el tamaño de las burbujas de aire. Asimismo, se estudió el efecto que tiene la presencia de una cuarta fase (biomasa en forma de *pellets* y micelio) sobre la dispersión de aire y aceite, encontrando que la biomasa en forma de *pellets* no tiene ningún efecto sobre la dispersión. Sin embargo, al utilizar biomasa en forma micelial se encuentra un aumento en la viscosidad del medio de cultivo. Este trabajo registró la medición en un punto cercano a la pared del tanque.

Utilizando un cultivo de *Escherichia coli* McMillan y Wang (1987) evaluaron el efecto de una fase dispersa (aceite) en la transferencia de oxígeno en el tanque de mezclado, a través del monitoreo de la demanda de oxígeno y la tensión de

oxígeno disuelto. Los autores reportan un aumento en la velocidad de transferencia de oxígeno debido a la presencia de la fase dispersa. Asimismo, Rols y Goma (1991) estudiaron el cultivo de *Aerobacter aerogenes* encontrando que el aceite de soya aumento la transferencia de oxígeno en el cultivo.

Utilizando la técnica de endoscopía, Angst y Kraume (2006) estudiaron, en tanques agitados de tres diámetros diferentes (0.2, 0.4 y 0.9 m), la dispersión de esferas poliméricas en 69 puntos diferentes de un tanque agitado. Los autores reportan que la potencia disminuye al aumentar la concentración de sólido en el medio, también, reportaron un incremento en la concentración de sólidos en la zonas cercanas a la pared del tanque. Asimismo, Lovick *et al.*, (2005) midieron, en un tanque agitado de 0.138 m de diámetro, en un medio líquido – líquido, el diámetro de gota en un punto cercano al impulsor, a la misma altura que éste. Sin embargo, no encontraron un efecto de la fase dispersa sobre la dispersión de gotas.

Utilizando succión capilar en un tanque agitado de 0.24 m de diámetro, Singh *et al.*, (2008) midieron el diámetro de gota de un medio líquido – líquido en dos diferentes puntos dentro del tanque de mezclado. Esta misma técnica de succión capilar fue utilizada por Laakkonen *et al.*, (2005c) quienes comparan dicha técnica con la técnica de análisis de imágenes y la técnica de anemometría laser. Utilizaron distintos sistemas líquido – gas para realizar mediciones del diámetro y cálculos del diámetro Sauter de las burbujas presentes en seis distintos puntos del tanque agitado. En ese mismo año se publicaron dos trabajos (Laakkonen *et al.*, 2005a y 2005b) que registran 15 diferentes puntos de medición dentro del tanque agitado, utilizando las técnicas antes mencionadas. Las mediciones se realizaron en 3 tanques agitados de diferentes escalas (12, 14, 194 y 200 L) y en dichos tanques encontró que existen diferencias en los diámetros Sauter y la distribución de diámetros en los distintos puntos de medición. Estos estudios se realizaron para validar las predicciones del comportamiento de las dispersiones por medio de *Computacional Fluid Dynamics* (CFD).

Utilizando CFD tridimensional, Kerdouss *et al.*, (2005) realizaron un mapa en el que se predice la dispersión de burbujas de gas dentro de un tanque agitado, las zonas con mayor cantidad de gas retenido (*gas hold up*) y los diámetros presentes. Este trabajo se realizó utilizando datos experimentales obtenidos por Alves *et al.*, (2002).

En el estudio de los fenómenos que ocurren dentro de tanques agitados y la dispersión presente en los mismos, se han realizado diversos trabajos. Los sistemas utilizados son bifásicos (líquido – líquido, líquido – gas y líquido – sólido). Los sistemas más complejos (trifásicos y tetrafásicos) son poco estudiados y los trabajos reportados en estos medios han medido un sólo punto cercano a la pared del tanque, el cual da información valiosa sobre el efecto de las fases y sustancias presentes en el medio, pero no se obtiene información de lo que ocurre en las zonas de mayor relevancia en un proceso de mezclado. Por otra parte, las predicciones matemáticas son complejas y sólo permiten la predicción de fenómenos bifásicos. La realización de un trabajo integral que mida diversos puntos en un tanque de mezclado utilizando medios de dos y tres fases permitirá la obtención de datos que permitan conocer el efecto que tienen las fases sobre la dispersión de gas y de nutrientes en los procesos bioquímicos.

4. OBJETIVO

4.1. Objetivo general

Caracterizar la dispersión de gotas de aceite y burbujas de aire en sistemas líquido-gas, líquido-líquido y líquido-líquido-gas, en diferentes posiciones dentro de un tanque de mezclado de nivel laboratorio, utilizando un sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad

4.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones de trabajo de un sistema de análisis de imágenes basado en la técnica de videoendoscopía acoplada a una cámara de alta velocidad para caracterizar las dispersiones multifásicas en distintos sitios dentro de un tanque de mezclado de nivel laboratorio
- Evaluar la dispersión de gotas de aceite en un sistema líquido-líquido en función de la posición espacial dentro de un tanque de mezclado de nivel laboratorio
- Evaluar la dispersión de burbujas de aire en un sistema líquido-gas en función de la posición espacial dentro de un tanque de mezclado de nivel laboratorio
- Evaluar la dispersión de gotas de aceite y burbujas de aire en un sistema líquido-líquido-gas en función de la posición espacial dentro de un tanque de mezclado de nivel laboratorio.

5. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

En la Figura 5-1 se muestra el diagrama de flujo que esquematiza la estrategia experimental que se siguió durante el desarrollo de este trabajo.

Como modelo de trabajo se utilizó el medio de cultivo que se emplea en el proceso de fermentación de *Trichoderma harzianum* para la producción de aromas (Serrano-Carreón *et al.*, 1997). Se utilizó un tanque de mezclado de 6.7 L con un sistema de agitación constituido por una turbina Rushton 0.5 T, operado a una potencia volumétrica de 0.25 kW/m³, una velocidad de aeración de 0.25 vvm de aire y 5 % (v/v) de aceite de ricino.

La adquisición de imágenes se realizó por videoendoscopia, usando una cámara de alta velocidad (Taboada *et al.*, 2002). Se adquirieron videos en diferentes zonas del tanque de mezclado en dos sistemas bifásicos: líquido-líquido y líquido-gas; y en uno trifásico: líquido-líquido-gas. Estas zonas fueron elegidas con base en las características físicas del tanque de mezclado y del sistema de endoscopia.

En una primera etapa del proyecto se probaron distintos sistemas de iluminación, los cuales se describen en la sección “materiales y métodos” y se definieron las condiciones de enfoque, nitidez y contraste para realizar el análisis de imágenes. Se establecieron las condiciones de operación (P/V, N, % aceite, suministro de aire, etc.) y se calibró el sistema de endoscopia.

En la segunda etapa, se adquirieron los videos y se analizaron mediante un software comercial de análisis de imágenes, midiendo los diámetros de gotas y de burbujas. De esta manera, se calculó el diámetro Sauter y se obtuvo la distribución de diámetros. Con esta información se realizó una comparación de los resultados obtenidos en diversas zonas del tanque de mezclado y se realizaron pruebas estadísticas (Turkey-Kramer) a los datos obtenidos para comprobar la existencia o no de diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre las distribuciones de diámetros de gotas y de burbujas obtenidas. Finalmente, se analizó el efecto que tiene la aireación sobre un sistema líquido – líquido, así como el efecto de una segunda fase inmiscible sobre la dispersión de aire en un sistema líquido-gas.

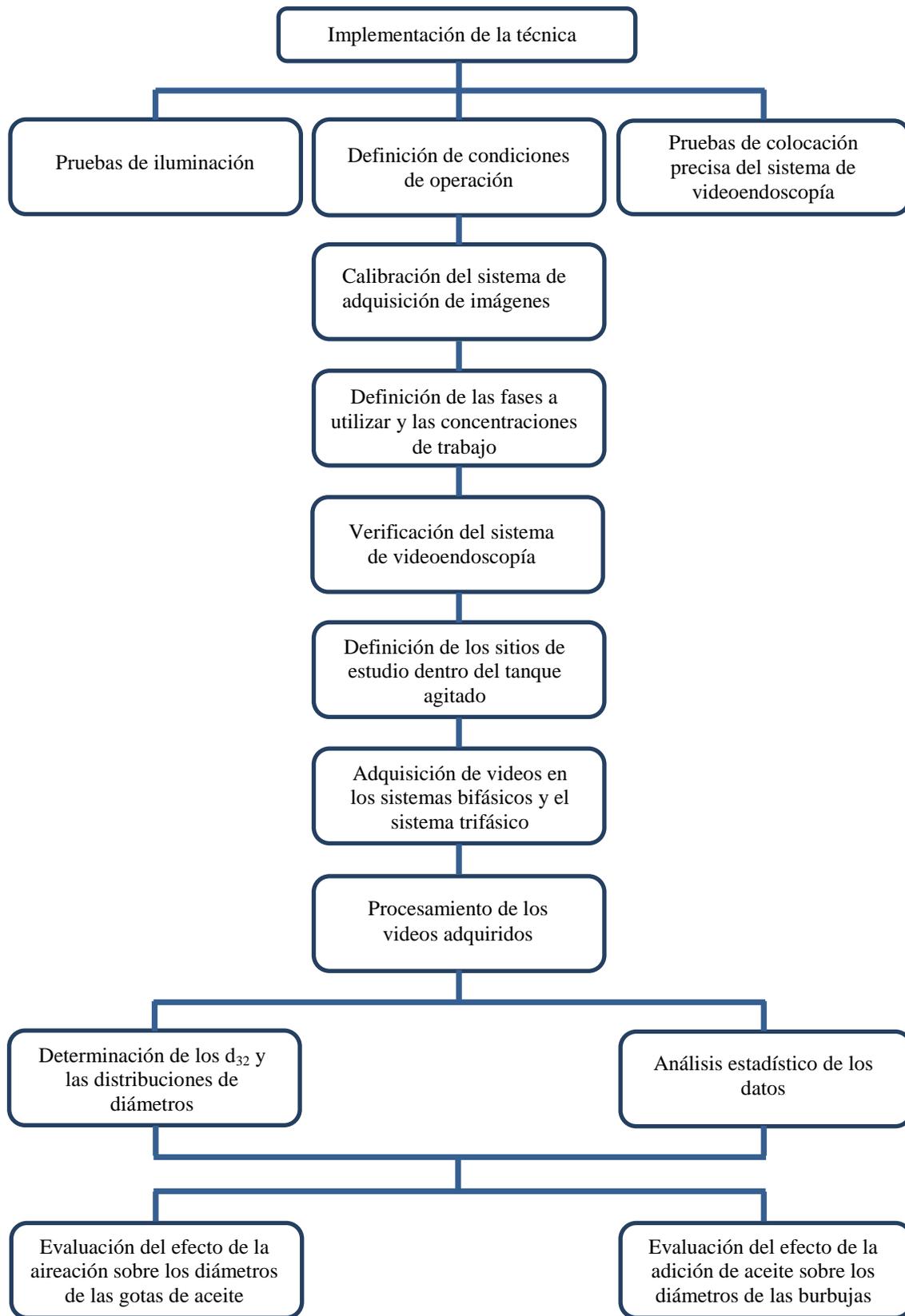


Figura 5-1. Estrategia experimental seguida en este trabajo.

Efecto de la posición espacial sobre la dispersión de gotas de aceite y burbujas de aire en dos sistemas bifásicos y un sistema trifásico dentro de un tanque agitado

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Tanque de mezclado

La adquisición de videos se llevó a cabo en un tanque cilíndrico de acrílico, con un diámetro interno (T) de 0.21 m y una altura (H) de 0.24 m, con cuatro deflectores (0.021 m de ancho y 0.24 m de altura) colocados de forma equidistante. El esquema del tanque se muestra en la Figura 6.1-1. El sistema de mezclado cuenta con un impulsor tipo turbina Rushton con relación de $D/T = 0.5$, el cual se colocó a 0.105 m (1D) del fondo del tanque. El volumen de trabajo utilizado fue de 6.7 L, que representa el 80 % del volumen total, obteniendo una altura del líquido (H_L) de 0.19 m.

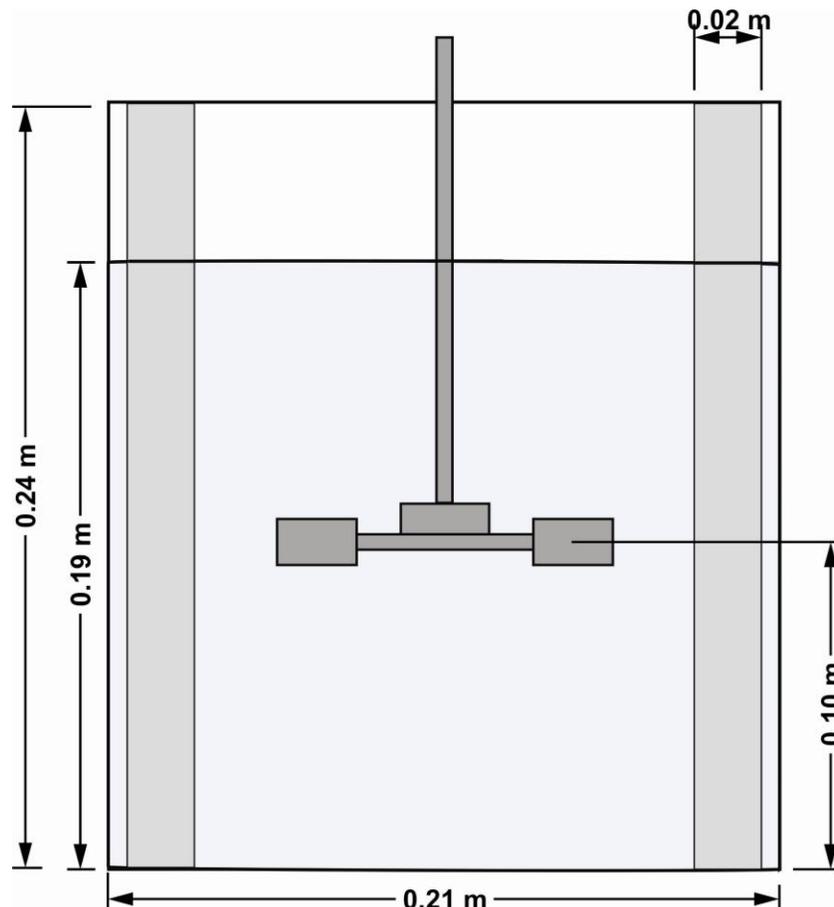


Figura 6.1-1. Tanque de mezclado de 6.7 L.

6.2. Medio y condiciones de operación

Se utilizó, en todos los experimentos realizados, el medio utilizado en el proceso de fermentación de *T. harzianum* (Serrano-Carreón *et al.*, 1997), cuya composición en g/L es: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 5, KH_2PO_4 , 7, Na_2HPO_4 , 2, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1.5, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.067, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.0001 y $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.008. El pH se ajustó a 5.6 con ácido fosfórico. Se agregó 5 % (v/v) de aceite de ricino como fase dispersa en los experimentos con el sistema líquido - líquido y el líquido - líquido - gas. La aireación se suministró a través de un difusor sinterizado de acero inoxidable con un tamaño de poro de 20 μm . En los medios aireados, se controló el flujo de aire en 0.25 vvm por medio de un medidor de flujo.

6.3. Sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad

Se utilizó el sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad descrito por Taboada *et al.*, (2002), para adquirir y procesar las imágenes necesarias para realizar el análisis de diámetros de gotas de aceite y de burbujas de aire. Este sistema de adquisición consta de una cámara digital de video de alta velocidad (*Redlake Motion Pro HS4-Microsys Technologies Inc.*) que permite adquirir hasta 5130 cuadros/segundo. La cámara cuenta con una memoria de 4 GB y una interfaz USB, mediante la cual se transfieren las secuencias de imágenes adquiridas hacia una computadora de escritorio, tipo PC.

La cámara está acoplada a un endoscopio de prisma oscilante (Serie 5, Olympus). El cuerpo del endoscopio está constituido por un tubo que tiene una longitud de 0.44 m y un diámetro de 0.008 m, al cual se le acopló una luz directa de arco Xenón de 180 W, transmitida al tanque por medio de una guía de luz de fibra óptica, conservando constante la distancia guía de luz/endoscopio de 0.05 m. El cuerpo de la guía de luz tiene una longitud de 0.7 m y un diámetro de 0.01 m. La cámara y el endoscopio son colocadas en un tripié para facilitar su posicionamiento en las diferentes zonas del tanque (Figura 6.3-1).

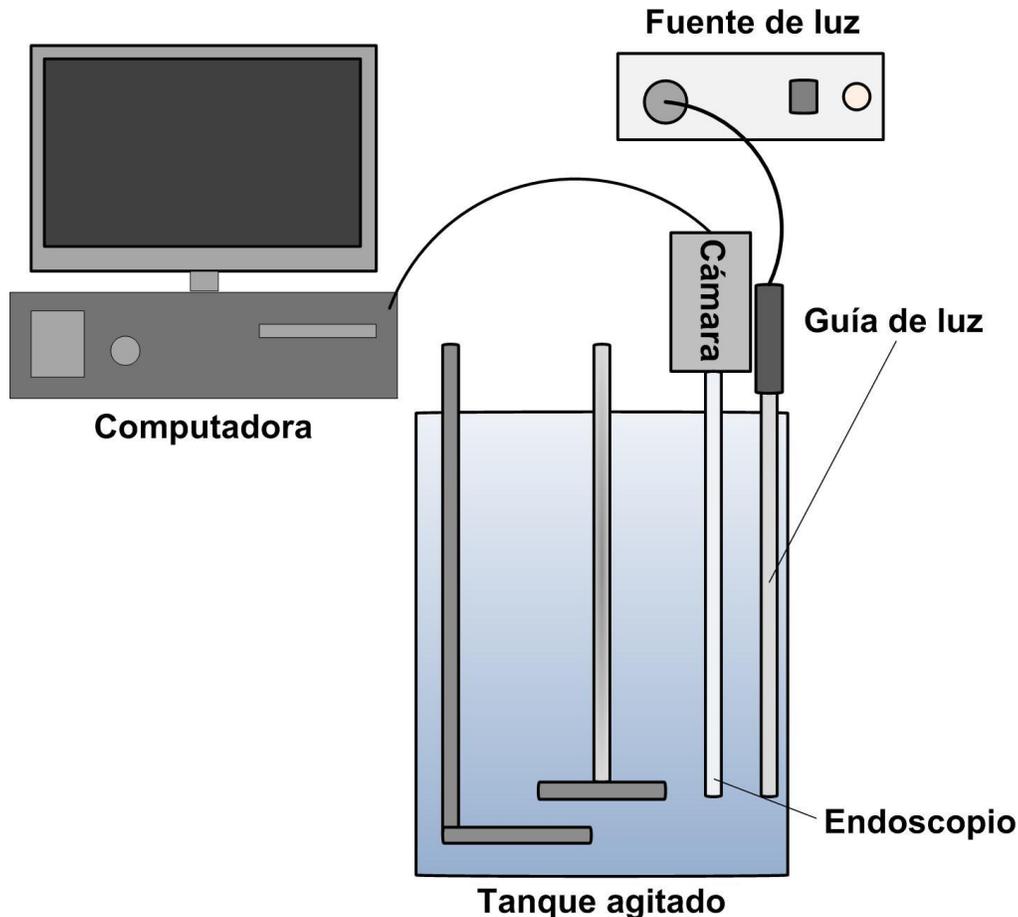


Figura 6.3-1. Sistema de endoscopía de alta velocidad.

6.4. Zonas de adquisición de videos

Para la definición de las zonas de estudio se utilizaron coordenadas cilíndricas (r, θ, z) (Figura 6.4-1). La zona de análisis en el tanque de 6.7 L, en la coordenada r ($\theta = 0^\circ$) es de 0.052 m (entre la pared del tanque y el impulsor). Se realizaron adquisiciones en dos zonas del tanque de mezclado a una distancia de $1 D$ en la coordenada z desde el fondo del tanque, es decir, la zona de descarga del impulsor, las cuales se ilustran en la Figura 6.4-2 y corresponden a zonas de mayor energía de disipación y por lo tanto, donde se ha registrado la mayor variación de tamaños de burbujas (Ng y Yianneskis, 2000; Kerdouss *et al.*, 2005). La zona A se encuentra en el punto $r = 0.09$ m, $\theta = 0^\circ$ y $z = D$ y la zona B ($r = 0.0675$ m, $\theta = 0^\circ$, $z = D$) fue la zona más cercana al impulsor que se pudo registrar, sin riesgo de dañar el equipo de adquisición con el impulsor.

Asimismo, se estudiaron tres puntos adicionales (D, E y F) que se localizan a una altura $z = 0.18$ m y que fueron elegidas por ser las zonas de recirculación del tanque, en una altura diferente a la zona de descarga del impulsor. La zona F se encuentra en las coordenadas $r = 0.02$ m, $\theta = 0^\circ$, $z = 0.18$ m, es decir a 2 cm de la flecha. La zona D se localiza en las coordenadas $r = 0.05$ m, $\theta = 0^\circ$, $z = 0.18$ m y la zona E en $r = 0.09$ m, $\theta = 0^\circ$, $z = 0.18$ m (cercana a la pared del tanque).

Debido a complejidad para colocar el equipo de endoscopía de una reproducible en los sitios de experimentación definidos, se adquirió un solo video de larga duración (15,000 cuadros) en cada zona de análisis. Esto permitió dividir en dos partes el video y analizar cada una de las partes como un duplicado del experimento.

6.5. Determinación de la potencia volumétrica

Se eligió utilizar la potencia volumétrica de 0.25 kW/m^3 en todos los experimentos realizados en este trabajo debido a que es una de las potencias utilizadas para la implementación de la técnica de análisis de imágenes por medio de video de alta velocidad. Ésta forma parte fundamental de la técnica de videoendoscopía que aquí se utiliza.

Se determinó la velocidad de agitación requerida para alcanzar la potencia volumétrica de 0.25 kW/m^3 con el impulsor Rushton de 0.5 T, en un medio bifásico sin airear y en medios bifásico y trifásico, con una aireación de 0.25 vvm. Las mediciones experimentales se realizaron con un dinamómetro de cojinete neumático descrito por Reséndiz *et al.*, (1991).

Dicho método se basa en la aplicación de la siguiente ecuación (Ascanio *et al.*, 2004):

$$\text{Potencia} = (\text{Par de torsión}) (\text{Velocidad de desplazamiento angular})$$

O bien:

$$P = 9.8067 (F) (B) (\omega) \quad \text{Ec 5}$$

Donde, P es la potencia [Watts], F es la fuerza [kg], B es el brazo de palanca [m] y ω la velocidad angular [s^{-1}].

Siendo:

$$\omega = 2\pi N$$

Ec 6

y N es la velocidad de rotación del impulsor (s^{-1}).

Se realizaron diez mediciones para el sistema aireado y diez mediciones para el sistema sin airear. Con los datos se calculó la media y la desviación estándar.

6.6. Iluminación del sistema

La iluminación del sistema de mezclado es fundamental para la obtención de imágenes de buena calidad para realizar el análisis de imágenes.

Se utilizó una guía de luz de arco Xenón utilizada por Guevara (2008) y por Taboada *et al.*, (2002) y se realizaron pruebas con otros sistemas de iluminación buscando mejorar la calidad de los videos adquiridos.

Se utilizaron tres sistemas diferentes:

- a) Guía interna del endoscopio
- b) *Spot* de 250 y 1000 W
- c) Lámpara de cono convencional con un foco de 200 W
- d) Fuente de luz de arco Xenón, acoplada a una guía de luz de fibra óptica

El endoscopio (Olympus) tiene una guía interna de fibra óptica que permite iluminar al mismo tiempo que se obtienen los videos. Se probó el sistema interno del endoscopio de manera directa y también utilizando un sistema de reflexión de luz por medio de un dispositivo cuya fotografía se ilustra en la Figura 6.6-1. Se probaron cuatro materiales de reflexión de la iluminación, tales como:

- a) Espejo
- b) Acrílico transparente
- c) Acrílico blanco
- d) Espejo con recubrimiento blanco

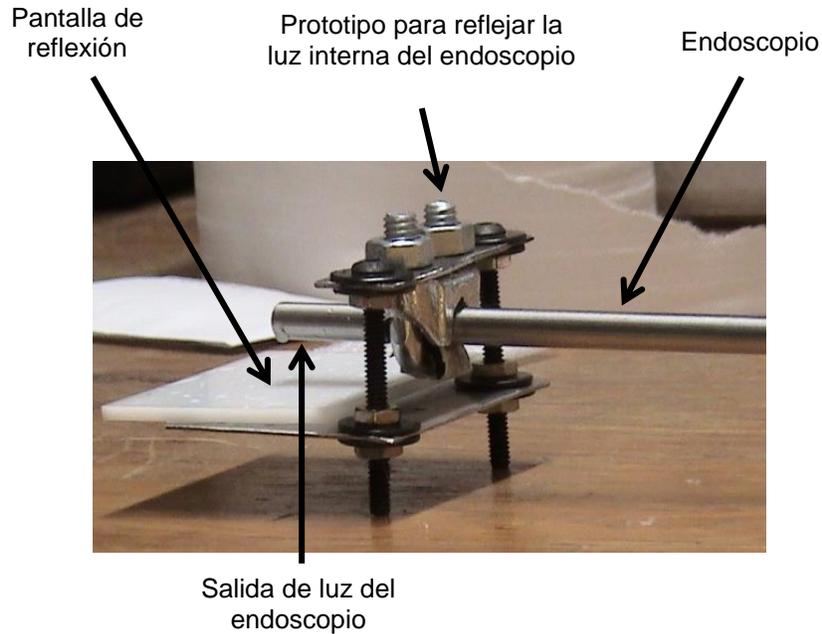


Figura 6.6-1. Prototipo de reflexión de luz acoplado al endoscopio.

De la misma forma, se utilizaron *spots* de 250 y 1000 W, que se colocaron en el exterior del tanque (Figura 6.6-2) y se probó una lámpara de cono convencional, la cual cuenta con un foco incandescente de 200 W, la cual se colocó en el exterior del tanque, dirigiendo la luz hacia el lente del endoscopio. La lámpara se muestra en la Figura 6.6-3.



Figura 6.6-2. Iluminación por medio de Spot.



Figura 6.6-3. Lámpara de cono convencional

También se examinó la opción de utilizar una fuente de luz arco Xenón de 180 W, directa. La luz se transmite al interior del tanque por medio de una guía de luz de fibra óptica, la cual fue acoplada al endoscopio de manera rígida (alineada con su eje óptico) de manera que se puedan mover simultáneamente por el tanque, conservando constante la distancia luz-endoscopio. La fuente de iluminación de arco Xenón (Fort) se puede observar en la Figura 6.6-4. Asimismo, una imagen de la prueba con el sistema de iluminación detallado se muestra en la Figura 6.6-5.



Figura 6.6-4. Fuente de iluminación arco Xenón

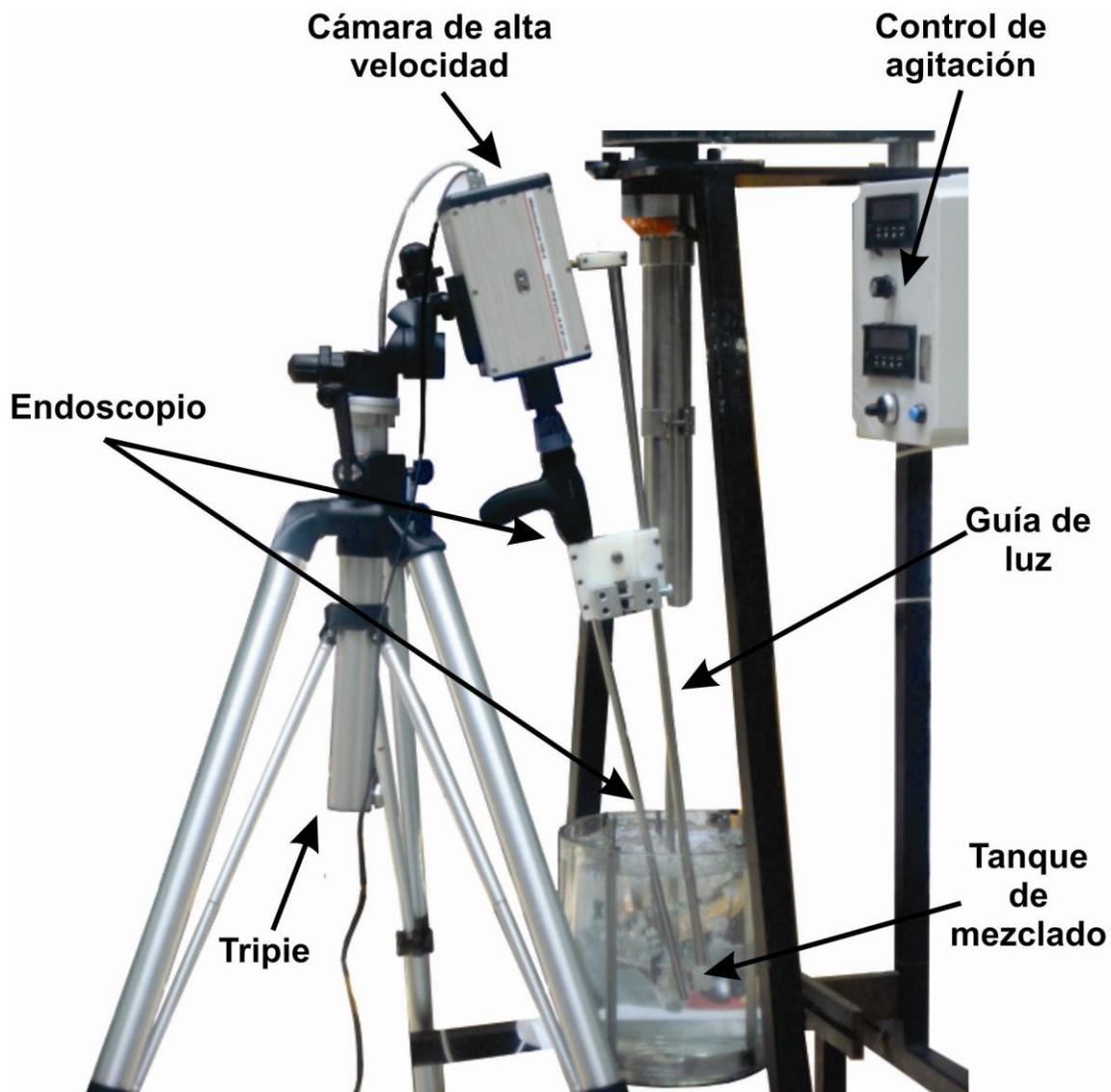


Figura 6.6-5. Prueba de iluminación con fuente de arco Xenón y guía de luz

6.7. Calibración del sistema de video de alta velocidad

La calibración del sistema se realizó con una regleta graduada en micrómetros, (Figura 6.7-1). Este objeto graduado se colocó dentro del tanque de mezclado a 1 cm del endoscopio y se adquirieron imágenes de los diferentes acercamientos (zoom) que permite el endoscopio.

Las imágenes obtenidas de los videos se procesaron con el programa *Image Pro Plus 5.0* (Media Cybernetics, USA) y se construyó una curva de calibración (pixeles/ μm para cada acercamiento).

También, se utilizaron esferas de poliestireno - divinil benceno de diámetro conocido de 200 y 1000 $\mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ (*Duke Scientific Corporation*). Se introdujo 1 g de esferas en el tanque de mezclado y se adquirieron imágenes que fueron procesados de igual forma para estimar la variación y el error en las mediciones.

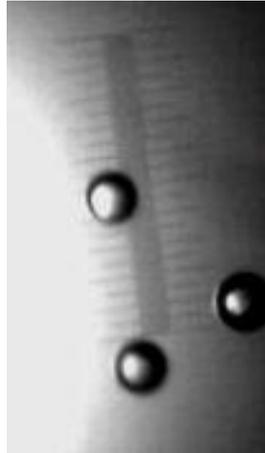


Figura 6.7-1. Imagen de la regleta graduada en micrómetros.

6.8. Montaje del sistema de videoendoscopía

El sistema de videoendoscopía se montó utilizando un tripié (Figura 6.8-1) y se colocó a una altura (z) de 1 D (0.105 m), es decir, a la altura de la descarga del impulsor. Se utilizaron tres diferentes configuraciones para colocar el endoscopio y la guía de luz dentro del tanque de mezclado.



Figura 6.8-1. Montaje del sistema de videoendoscopía en el tanque de mezclado.

En las Figura 6.8-2 y Figura 6.8-3 se ilustran la primera configuración utilizada, en la cual la lente del endoscopio y la salida de la guía de luz están colocadas a la misma altura (descarga del impulsor) y en dirección opuesta, haciendo coincidir la dirección de la luz en el lente del endoscopio. El endoscopio se encuentra entre la guía de luz y el impulsor del sistema de mezclado.

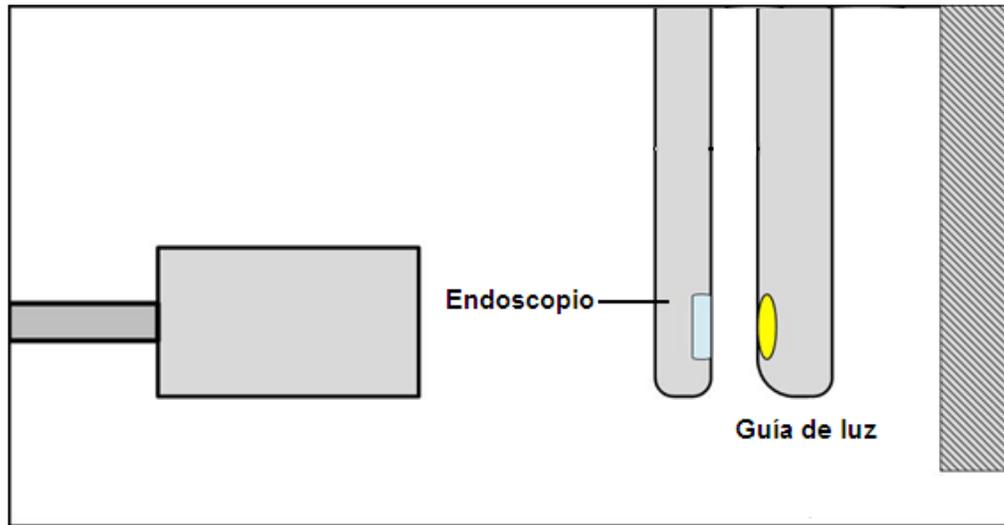


Figura 6.8-2. Configuración 1, endoscopio entre la guía de luz y el impulsor.

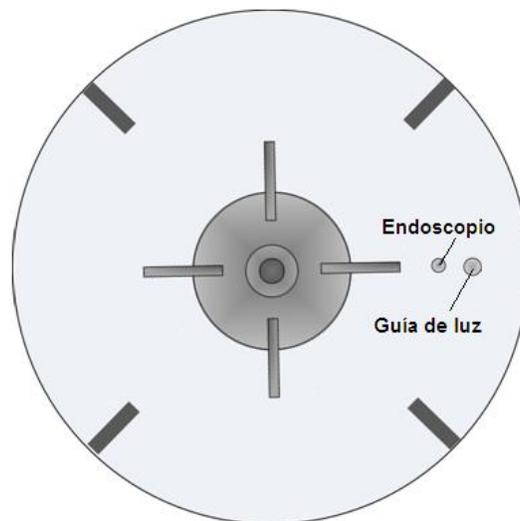


Figura 6.8-3. Vista superior del tanque de mezclado con el endoscopio, configuración 1.

En la segunda configuración utilizada se mantuvieron en la misma altura el endoscopio y la guía de luz. La distancia y orientación de las lentes se mantuvo; sin embargo, la guía de luz se colocó entre el impulsor y el endoscopio. En las

Figura 6.8-4 y Figura 6.8-5 se presentan gráficamente los detalles de la configuración descrita.

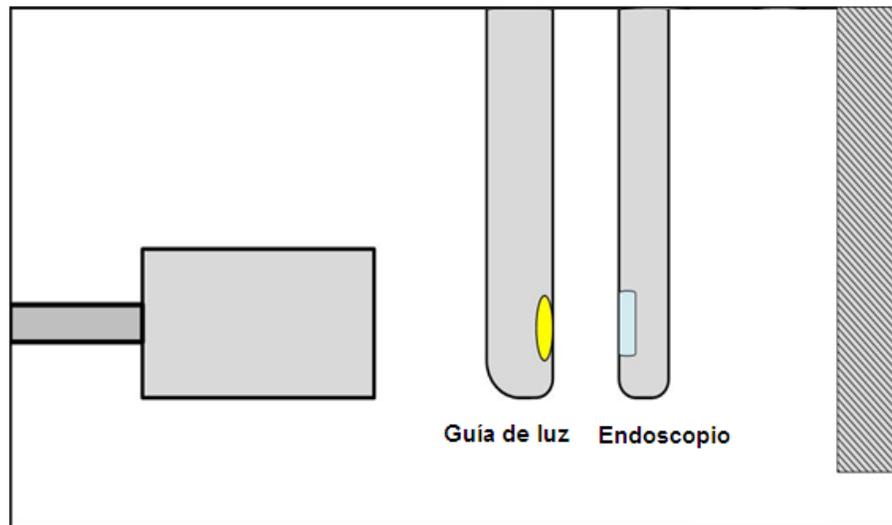


Figura 6.8-4. Configuración 2, guía de luz entre el endoscopio y el impulsor.

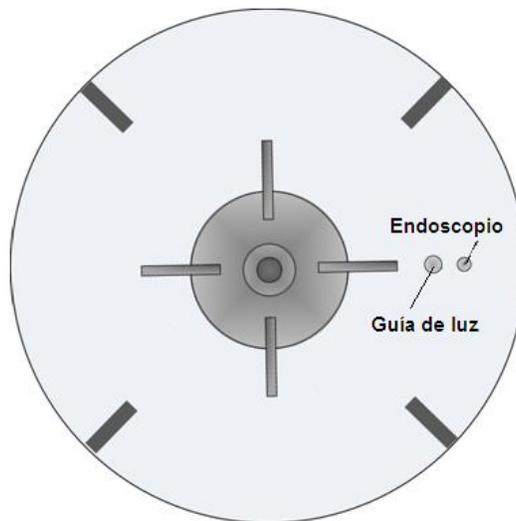


Figura 6.8-5. Vista superior del tanque de mezclado con el endoscopio, configuración 2.

Por último, se usó una tercera configuración, colocando en este caso el endoscopio y la guía de luz a la misma altura (descarga del impulsor) y a la misma distancia del impulsor, es decir, ambos equipos se colocaron entre el impulsor y la pared del tanque. En las Figura 6.8-6 y Figura 6.8-7 se muestran esquemas que ilustran la configuración descrita.

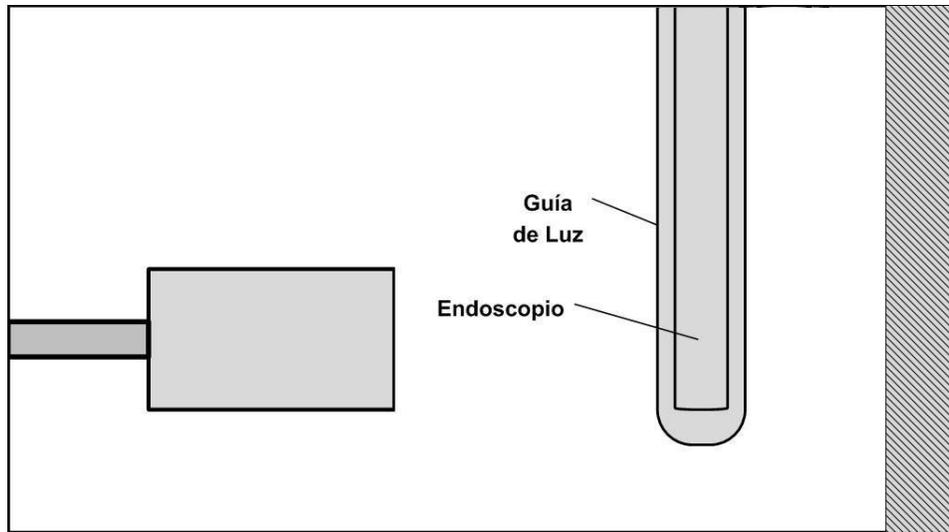


Figura 6.8-6. Configuración 3, guía de luz y endoscopio entre impulsor y pared del tanque.

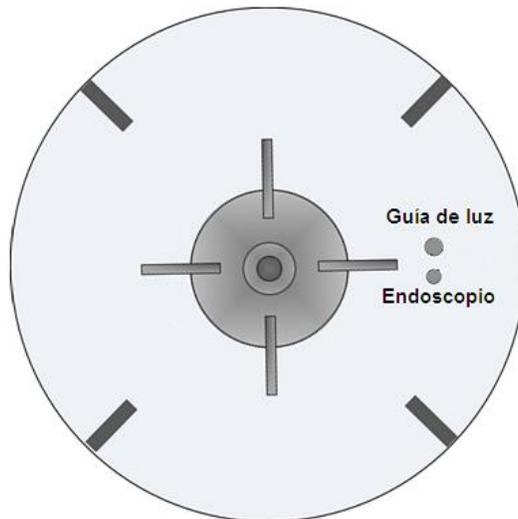


Figura 6.8-7. Vista superior del tanque de mezclado con el endoscopio, configuración 3.

Utilizando las tres configuraciones antes descritas, se obtuvieron cuatro videos, con cada configuración mostrada, de 1000 cuadros cada uno, del sistema líquido – líquido – gas, con lo cual se pudieron capturar más de 300 burbujas y cerca de 500 gotas, que son las necesarias para el análisis de imágenes como se había descrito anteriormente. En el caso del sistema de videoendoscopia de alta velocidad se requiere una mayor cantidad de imágenes para poder obtener la cantidad de objetos necesaria para la evaluación del sistema, debido principalmente a la alta velocidad de captura de los videos que permite observar los objetos enfocados más tiempo (durante 30 cuadros más) que en los sistemas

antes utilizados en el laboratorio, los cuales requerían típicamente ocho videos de 200 imágenes, es decir, 1600 imágenes. Sin embargo, con este sistema de videoendoscopia se requirieron de alrededor de 4000 cuadros o imágenes para obtener el mismo número de objetos con la calidad necesaria para el análisis, lo que nos obliga a seguir la secuencia de imágenes y descartar aquellos objetos que hayan sido registrados anteriormente para no hacer mediciones duplicadas.

Las imágenes adquiridas fueron procesadas y se midieron los diámetros de las gotas y las burbujas enfocadas en los videos. Asimismo, se calculó el diámetro Sauter y se graficó la distribución de tamaños de objetos.

6.9. Error calculado

Para realizar cálculos experimentales en sistemas de adquisición de imágenes es muy importante calibrar el sistema de adquisición, considerando la distancia focal (distancia existente entre el plano de la imagen y el plano de la óptica de la cámara) y la profundidad de campo (rango de distancias en donde la imagen está enfocada).

El termino profundidad de campo no se refiere a una zona en la que la fotografía está enfocada perfectamente, más bien, es la zona donde el foco es lo suficientemente cercano al plano nítido para que la imagen obtenida tenga la suficiente calidad para ser analizada.

El análisis de imágenes depende de la nitidez y el enfoque de los objetos, por lo que un objeto nítido en una imagen no estará necesariamente en el mismo plano focal que otro que aparentemente tenga el mismo enfoque. Por ello, el error producido por la profundidad de campo y la distancia focal debe ser calculado. Para calcular este error se utilizó la regleta graduada de 1000 μm montada en una platina de microscopio. Esta regleta se conectó a un controlador de movimiento y a una computadora que envía señales para el movimiento preciso de la platina. El arreglo se muestra en la Figura 6.9-1. El medio utilizado fue bifásico (líquido – gas) y fue iluminado mediante una lámpara de 200 W. Después de montar el equipo, se iluminó la regleta graduada y ésta se fue acercando mediante la platina en pequeños pasos de 1 μm a la vez. Mientras se acerca la regleta, se va capturando

la imagen en la computadora mediante el sistema de videoendoscopía. Cuando la imagen en la pantalla de la computadora se ve nítida y enfocada, se mide la distancia entre el endoscopio y la regleta y se captura la imagen para su posterior análisis. Posteriormente se continúa acercando la regleta hasta que la imagen aparece desenfocada. La distancia focal será la media entre las dos distancias medidas, la primera y la última enfocada. La profundidad de campo es la diferencia entre las dos distancias medidas. Con estos datos se calculó el error generado por ambos factores.

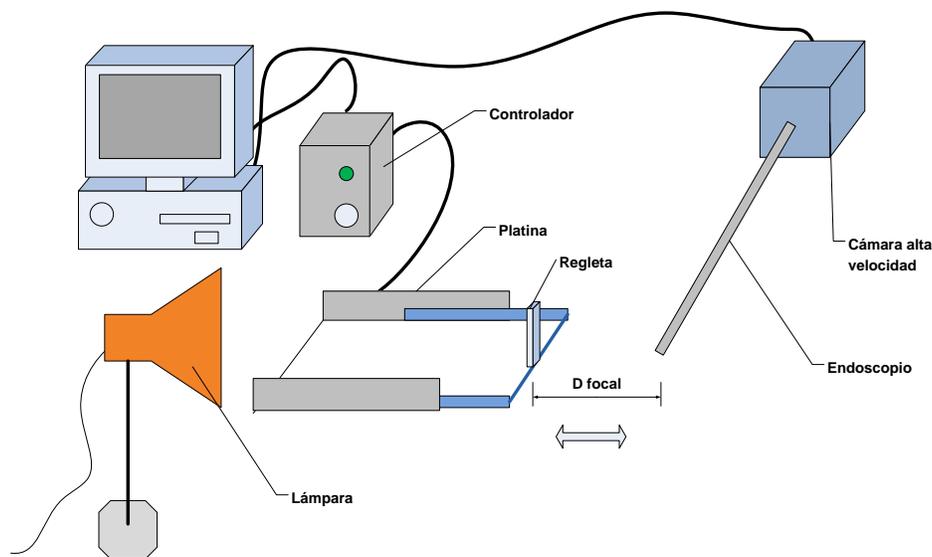


Figura 6.9-1. Arreglo para cálculo de distancia focal

6.10. Precisión y Exactitud

Para calcular la precisión y la exactitud de la técnica se utilizó un video de las esferas de tamaño conocido ($200\ \mu\text{m}$) antes descrito. En el caso de la precisión se eligió la imagen de una esfera y se midió 50 veces. De los datos obtenidos se calculó la media y el error. Asimismo, para calcular la exactitud se midieron 50 esferas diferentes en un video, posteriormente se obtuvieron los parámetros estadísticos y el error.

6.11. Adquisición y procesamiento de imágenes

6.11.1. Adquisición

Para obtener las imágenes con el sistema de videoendoscopía de alta velocidad se obtuvo un video de 16000 imágenes a una velocidad de 5130 imágenes/s de la dispersión en el tanque de mezclado utilizando una turbina Rushton 0.33 (D/T) a 0.25 kW/m^3 . Con estas imágenes se determinaron los diámetros Sauter de gotas de aceite y burbujas de aire, considerando que para obtener un error menor al 10 % en la determinación de los mismos se requieren al menos 500 gotas de aceite y 300 burbujas (Brito-Albavera, 2001).

6.11.2. Preproceso

Se realizó un pre proceso de los videos que consiste en la selección de las mejores imágenes, discriminando entre ellas de acuerdo a sus características, como son enfoque y nitidez de los objetos (gotas de aceite y burbujas de aire) que se quieren medir.

En este mismo pre proceso también se debe dar un seguimiento de los objetos que en ellos aparecen, para evitar repeticiones de objetos, asegurándonos que el objeto medido no sea seleccionado nuevamente (Guevara, 2008).

6.11.3. Análisis de datos

La medición de los diámetros se hizo con las herramientas del programa *Image Pro Plus 5.0*, definiendo un círculo por medio de tres puntos en la circunferencia (Figura 6.11.3-1) (Guevara, 2008; Taboada *et al.*, 2002).

Las mediciones fueron exportados a una hoja de cálculo del programa *Microsoft Excel 2007* (Figura 6.11.3-2) y diferenciados para determinar el diámetro Sauter, así como la media, desviación estándar, valores máximos y mínimos para las gotas de aceite y de burbujas de aire. Asimismo, se hicieron grupos de datos utilizando la desviación estándar, la media y el número de datos analizados para normalizar los datos por medio de las frecuencias relativas y la densidad de frecuencias y así construir las distribuciones de manera que sean comparables entre ellas, como lo reporta Brito-Albavera (2001).

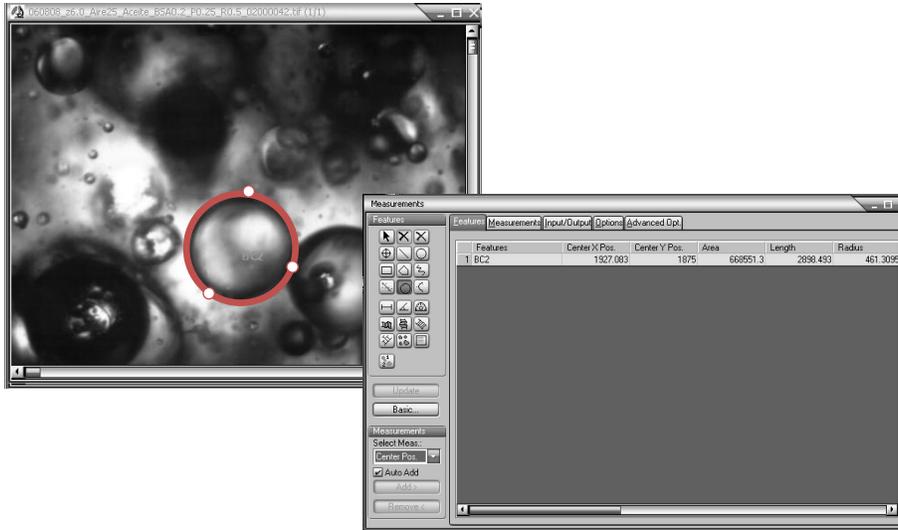


Figura 6.11.3-1. Medición de diámetros de gotas utilizando la herramienta de tres puntos del programa

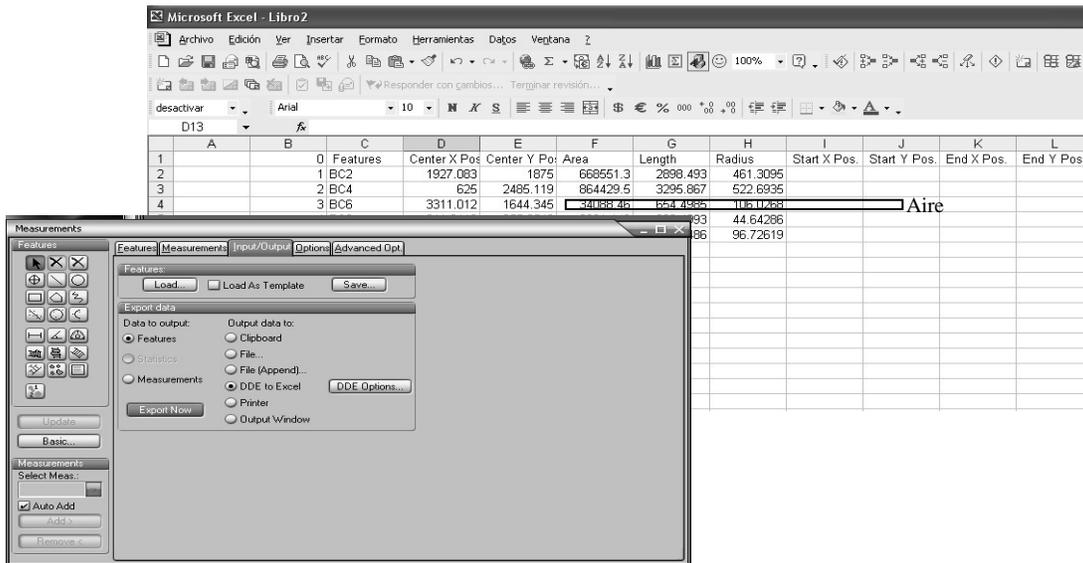


Figura 6.11.3-2. Exportación de los datos obtenidos a una hoja de cálculo.

6.11.4. Estadística

Los datos se clasificaron de acuerdo a su origen (gotas de aceite o burbujas de aire) y se calculó la media, desviación estándar, número de datos, valor mínimo y valor máximo, mediante la opción *estadística descriptiva* disponible en el programa *Microsoft Excel 2007*. Posteriormente, se determinó el diámetro Sauter y la frecuencia relativa (FR) y la densidad de frecuencia para construir la distribución de diámetros de burbujas de aire y gotas de aceite mediante un histograma, como lo señala Brito-Albavera (2001). Asimismo, se calcularon los datos para construir

las gráficas de distribución de diámetros. Para obtener un error menor al 10 % en la determinación, se evaluaron la cantidad de objetos (gotas y burbujas) establecida por Brito-Albavera (2001).

Una vez obtenidos las distribuciones de diámetros para los diferentes sitios evaluados, se hizo una comparación de las distribuciones mediante una prueba de Turkey Kramer (Guevara, 2008), con la finalidad de conocer si existía diferencia estadística significativa ($\alpha=0.05$), La prueba se ejecutó con la ayuda del programa *Stats Direct (Stats Direct Ltd)*.

7. RESULTADOS

7.1. Potencia volumétrica

Los datos de potencia volumétrica y velocidades de agitación obtenidos se muestran en la Tabla 1. Se utilizó la ecuación 5 presentada en la sección 6.5 y se realizaron pruebas en los sistemas aireados y sin airear. Para mantener la potencia volumétrica en 0.25 kW/m^3 en el sistema líquido - líquido (sin aireación) se requiere una velocidad de rotación del impulsor de 217 rpm. En el caso del sistema líquido - gas y líquido - líquido - gas (aireados) se necesita una velocidad de rotación del impulsor en 249 rpm. Se requiere una mayor velocidad de agitación en el caso del sistema aireado, debido a una disminución en el consumo de energía que se refleja en la caída de presión causada por la presencia de cavernas de gas en la parte posterior del impulsor.

Tabla 1 Resultados de la medición de potencia volumétrica en los sistemas bifásicos y trifásico

Medición	Sistema aireado		Sistema sin airear	
	Velocidad de agitación (rpm)	Potencia Volumétrica (kW/m^3)	Velocidad de agitación (rpm)	Potencia Volumétrica (kW/m^3)
1	249	0.253	217	0.254
2	249	0.253	217	0.254
3	248	0.252	215	0.252
4	250	0.254	217	0.254
5	251	0.255	217	0.254
6	248	0.252	217	0.254
7	249	0.253	216	0.253
8	249	0.253	217	0.254
9	249	0.253	218	0.255
10	249	0.253	217	0.254
Media	249	0.253	217	0.254
Desviación estándar	0.93	8×10^{-3}	0.79	9×10^{-3}

Posteriormente, se calculó el número de Reynolds (Re) para el sistema aireado y no aireado, con los datos obtenidos y la ecuación que se muestra a continuación:

$$Re = \frac{ND^2}{\gamma} \quad \text{Ec 7}$$

Los valores de Re calculados son 38,240 para el sistema sin airear y de 44,090 para el sistema aireado. Se puede observar que ambos sistemas se encuentran en régimen de flujo turbulento.

7.2. Selección del sistema de iluminación

Como se mencionó en la sección “materiales y métodos”, se probaron cuatro sistemas diferentes de iluminación para encontrar una fuente de iluminación de alta intensidad que permita obtener videos de alta calidad, es decir, con la nitidez y el contraste suficiente para el análisis de imágenes y la determinación de diámetros de burbujas de aire y gotas de aceite.

7.3. Guía interna del endoscopio

Los videos obtenidos utilizando el sistema de iluminación interna del endoscopio fueron de baja calidad. El sistema de video de alta velocidad requiere que la iluminación se coloque de frente a la lente del endoscopio, condición que la guía interna del equipo no puede proporcionar. Para resolver este problema se desarrolló un dispositivo, el cual se describió a detalle en el capítulo 6. Con este dispositivo se lograron obtener videos de buena calidad para el análisis de imágenes. Sin embargo, estos videos se obtuvieron a velocidades muy bajas de captura (menos de 800 cuadros por segundo), ya que la cámara requiere una iluminación de mayor intensidad para obtener videos a velocidades de adquisición superiores (entre 2000 y 5000 cuadros por segundo). Se probaron cuatro materiales de reflexión (espejo, acrílico transparente y blanco y espejo con recubrimiento) sin lograr mejorar los resultados.

Por otra parte, la hidrodinámica del tanque es afectada notablemente si se utiliza la guía interna del endoscopio acoplada al dispositivo diseñado para reflejar la luz a la lente del endoscopio, esto se debe a las dimensiones y forma del dispositivo de reflexión.

7.3.1. Spot de 250 W y 1000 W

La intensidad y calidad de la iluminación obtenida con los *spots* de 250 W fue insuficiente para adquirir videos con la nitidez y contraste necesario para el análisis de imágenes. Por ello, se descartó esta opción y se seleccionó uno de mayor intensidad (1000 W).

Las pruebas realizadas con los *spots* de 1000 W si permitieron capturar videos a altas velocidades con mejor calidad que las obtenidas hasta ese momento. Sin embargo, los *spots* generan una gran cantidad de calor, por lo que después de tres minutos es posible incluso quemar el acrílico del cual está construida la camisa de enfriamiento del tanque de mezclado. En la Figura 7.3.1-1 se muestra una imagen del video obtenido con el spot de 1000 W, en la cual se observa un buen contraste de las burbujas de aire capturadas, con respecto al sistema de iluminación utilizado previamente.

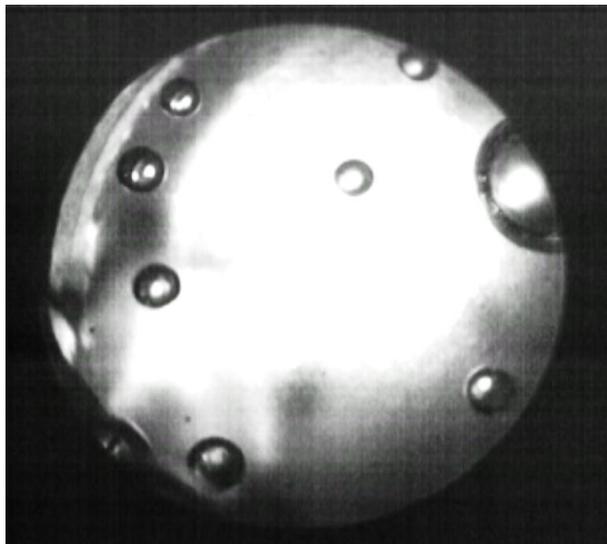


Figura 7.3.1-1. Video obtenido con spot de 1000 W

7.3.2. Lámpara de cono convencional

Se utilizó una lámpara de cono convencional con un foco de 200 W, colocada fuera del tanque y dirigida hacia el endoscopio (que se encontraba dentro del tanque). Se logró una iluminación homogénea, por lo que se obtuvieron videos que cumplieran con las condiciones necesarias para el análisis de imágenes. Sin embargo, el proceso de colocación de la lámpara demandó mucho tiempo (entre

una y dos horas) debido a la complejidad para hacer coincidir la dirección de la luz generada con el lente del endoscopio. Además, los videos se capturaron a velocidades de adquisición menores de 1000 cuadros por segundo, ya que la intensidad de iluminación no fue suficiente para trabajar con una mayor velocidad de la cámara. Esto implica que los objetos que se mueven a altas velocidades dentro del tanque de mezclado no pueden ser captados por la cámara con la calidad suficiente para realizar la medición de sus diámetros, sesgando así la muestra experimental.

7.3.3. Luz de arco Xenón

Por último, se utilizó una fuente de luz Arco Xenón de 180 W. La luz se transmitió al interior del tanque por medio de una guía de luz de fibra óptica, la cual fue acoplada al endoscopio de manera rígida (alineada con su eje óptico) de manera que se puedan mover simultáneamente por el tanque, conservando constante una distancia luz-endoscopio (1.5 cm) y manteniendo la luz emitida directamente sobre el lente del endoscopio. Con este sistema fue posible capturar videos a la máxima velocidad permitida por la cámara, con las condiciones de nitidez y contraste necesarios para llevar a cabo precisamente el análisis de imágenes. Además, no se presentó daño en el equipo o sus accesorios debido a que este dispositivo de iluminación no genera calor. Con este tipo de iluminación se adquirieron videos enfocados de burbujas de aire y gotas de aceite, utilizados en este trabajo para evaluar experimentalmente los sitios seleccionados dentro del tanque de mezclado.

En la Figura 7.3.3-1 se muestra una imagen adquirida por medio del sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad con una iluminación obtenida a través de la fuente de luz de arco Xenón y la guía de luz. Se puede observar una iluminación homogénea, además de un claro contraste de las gotas de aceite, que permite realizar la medición de los objetos.

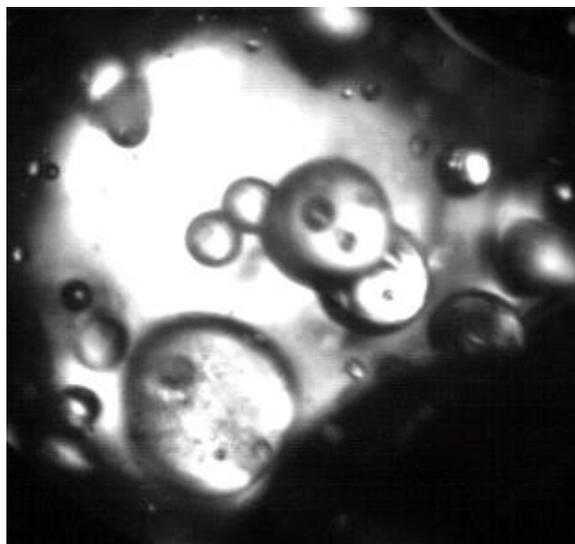


Figura 7.3.3-1. Imagen capturada utilizando la fuente de luz de arco Xenón

7.4. Calibración del sistema

En la Figura 7.4-1 se muestra la curva de calibración obtenida para el sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad. Dicha curva muestra las equivalencias en pixeles/micrómetro para los diferentes acercamientos que proporciona el endoscopio. Estas calibraciones son proporcionadas al sistema *Image Pro Plus 5.0* para poder realizar la segmentación.

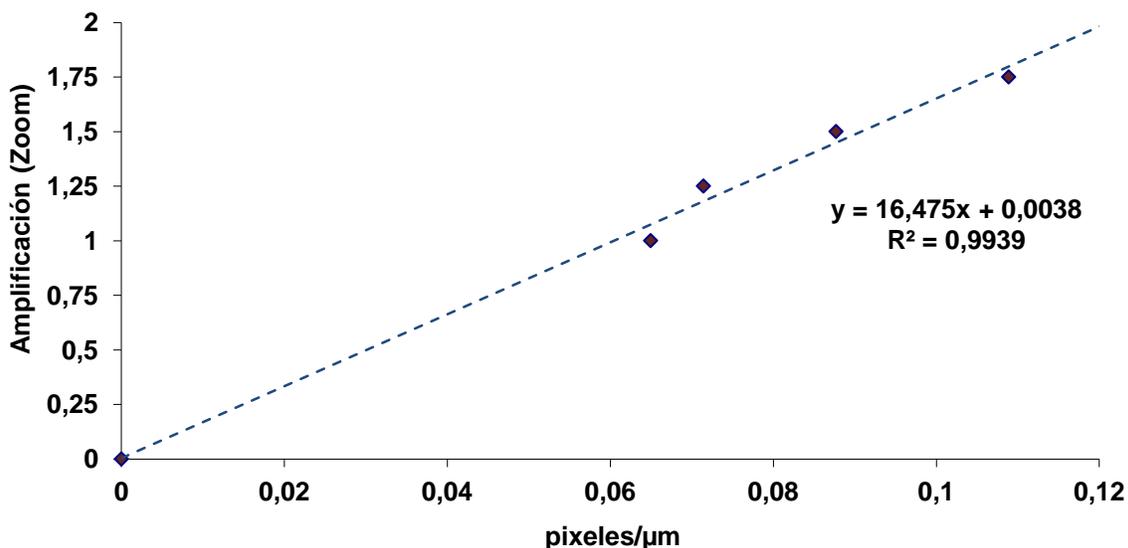


Figura 7.4-1. Curva de calibración para el sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad.

7.4.1. Error experimental

El cálculo del error experimental de la técnica videoendoscópica se realizó en el sistema líquido-gas. Se analizaron las imágenes, obtenidas mediante el arreglo experimental ilustrado en la Figura 6.9-1. Se calculó la distancia y la profundidad de campo. El error calculado por este método para la videoendoscopia fue de 7 %.

7.4.2. Verificación de la calibración

Se adquirieron videos de esferas patrón de 200 y 1000 μm . En la Figura 7.4.2-1 se observa la imagen de una esfera de 200 μm . Los videos fueron procesados y se midieron 50 objetos para obtener el error experimental que puede ocurrir en el sistema de videoendoscopia acoplado a la cámara de alta velocidad. Con los datos obtenidos, se calculó un error de 6.9 %, el cual es bajo si tomamos en cuenta que el proveedor de las esferas reporta una variación en sus diámetros de 4 %. Asimismo, se calculó el error debido a la reproducibilidad en las mediciones que lleva a cabo el experimentador. Este cálculo se realizó eligiendo una esfera en el video, midiéndola 50 veces, encontrando una precisión de medición mayor al 99 %. También se evaluó la calibración realizada por medio de la regla graduada, antes descrita. Para esto, se seleccionó un video adquirido, se midieron 50 esferas de tamaño definido y la exactitud de las mediciones fue mayor a 99%.

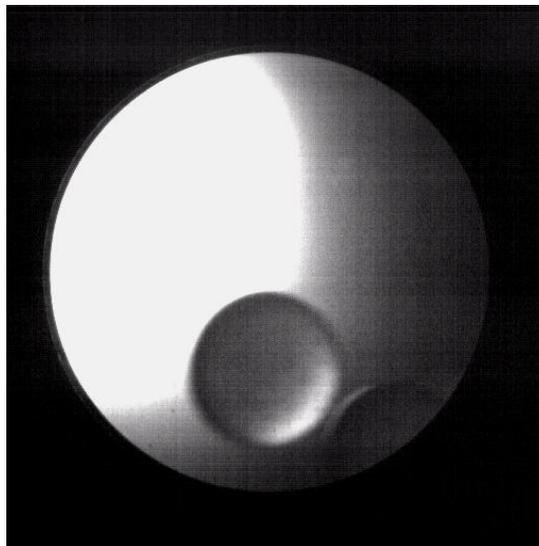


Figura 7.4.2-1. Esfera de 200 μm capturada por videoendoscopia.

7.5. Imágenes obtenidas

En la Figura 7.5-1 se muestran secuencias de imágenes obtenidas con el sistema de videoendoscopía acoplado a la cámara de alta velocidad y utilizando el sistema de iluminación que consiste en la fuente de luz Xenón y la guía de luz. Las secuencias de imágenes fueron obtenidas de videos adquiridos en la zona más cercana al impulsor, bajo las condiciones descritas en la sección de materiales y métodos.

La Figura 7.5-1a muestra la secuencia de imágenes en un sistema líquido-líquido. Se observan objetos multifásicos, es decir, gotas de aceite con inclusiones de gotas de la fase continua. Se pueden distinguir claramente las gotas de aceite enfocadas, las cuales presentan un mayor contraste y su medición permitió obtener resultados confiables de acuerdo a las calibraciones del sistema. La Figura 7.5-1b muestra la secuencia de imágenes adquiridas en un sistema líquido-gas. En la secuencia se observa la interacción de dos burbujas de aire a lo largo de la secuencia hasta que coalescen. En la Figura 7.5-1c se observa la secuencia de imágenes capturadas en un sistema trifásico, donde se distingue la presencia de gotas de aceite (esferas transparentes) y de burbujas de aire (esferas oscuras). Asimismo, se observa una gota de aceite que pareciera tener incluida una burbuja de aire. Sin embargo, en la secuencia se observa también una burbuja de aire en un segundo plano (al costado izquierdo de la imagen). Al analizar la secuencia completa se observa que esta burbuja es la causante del reflejo que se observa dentro de la gota, dando la apariencia de una inclusión.

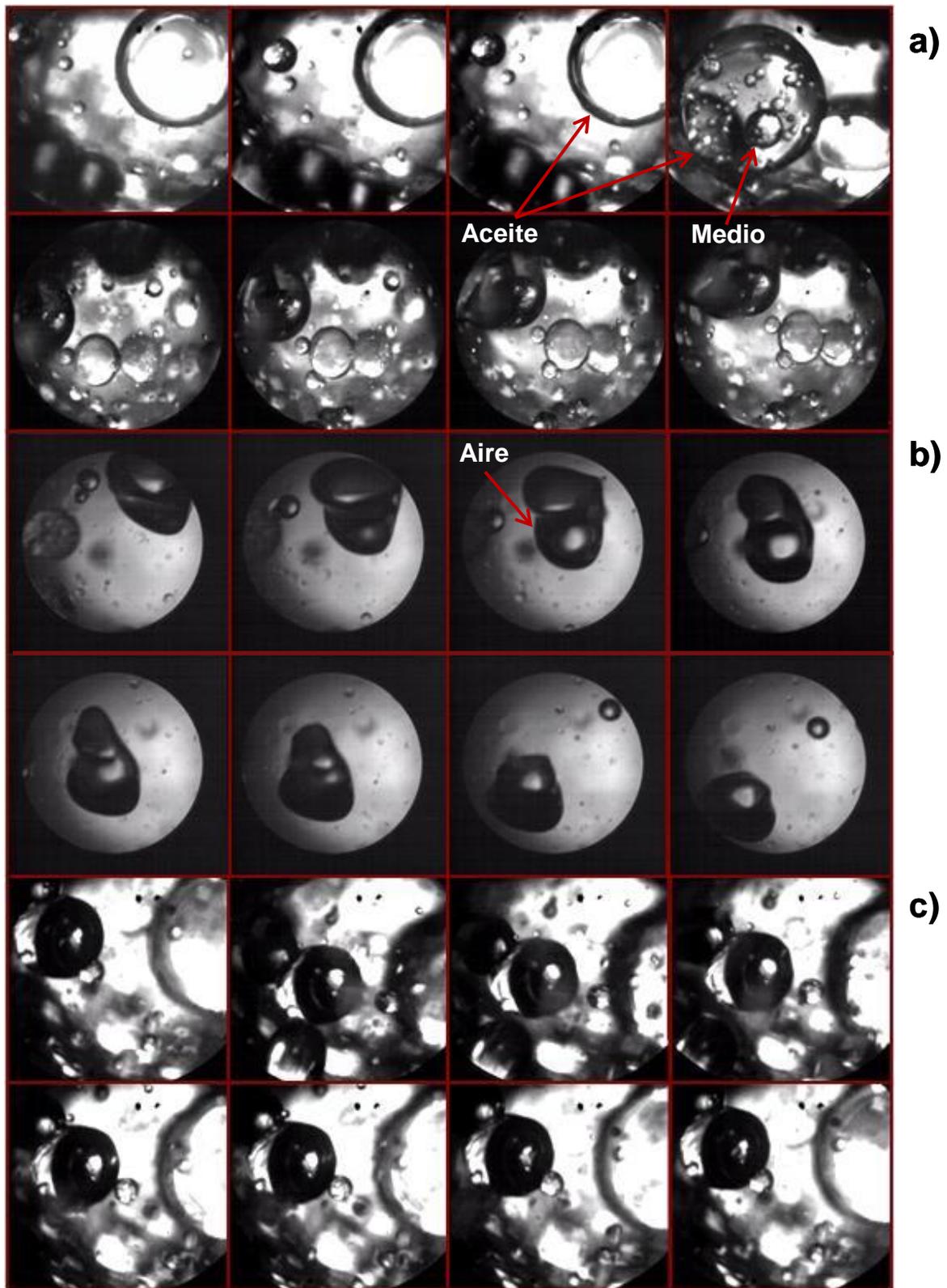


Figura 7.5-1. Imágenes obtenidas con el sistema de videoendoscopia acoplado a la fuente de luz Xenón. P/V 0.25 kW/m^3 , 5% v/v, 0.25 vvm , 5 minutos de agitación (a) Sistema líquido-líquido (b) Sistema líquido-gas (c) Sistema trifásico.

7.6. Evaluación de la posición del endoscopio y la guía de luz en el sistema de videoendoscopia

Se evaluó el efecto que tiene la posición del endoscopio y la guía de luz sobre la distribución de burbujas de aire, debido a la posible perturbación en el patrón de flujo que podría provocar la presencia de dichos instrumentos dentro del tanque de mezclado. Se evaluaron tres configuraciones diferentes en el montaje del sistema de videoendoscopia en un medio líquido – gas. La descripción de las tres configuraciones y las condiciones utilizadas son descritas en la sección 6.8, Figura 6.8-2 a la Figura 6.8-7.

La Figura 7.6-1 muestra la distribución de los diámetros de burbujas de aire en un sistema líquido – gas y se observa que no existe diferencia entre las distribuciones, lo que indica que la configuración en la que se coloca el sistema de videoendoscopia dentro del tanque de mezclado no influye en los tamaños de objetos que se encuentran en él. Para corroborar que no existe diferencia significativa se realizó una comparación de distribuciones Turkey-Kramer ($\alpha=0.05$), por medio del programa computacional estadístico *Mini tab 16* y se encontró que no existe diferencia estadística significativa entre las tres distribuciones. Los resultados de los análisis estadísticos se presentan en el Anexo I. El diámetro Sauter (d_{32}) calculado fue de 683 μm para la configuración 1, de 681 μm para la configuración 2 y en el último caso (configuración 3) fue de 686 μm . De esta forma se confirma que no existe un efecto de la manera de colocar el endoscopio y la guía de luz sobre los resultados obtenidos por la técnica de videoendoscopia de alta velocidad dentro del tanque de mezclado.

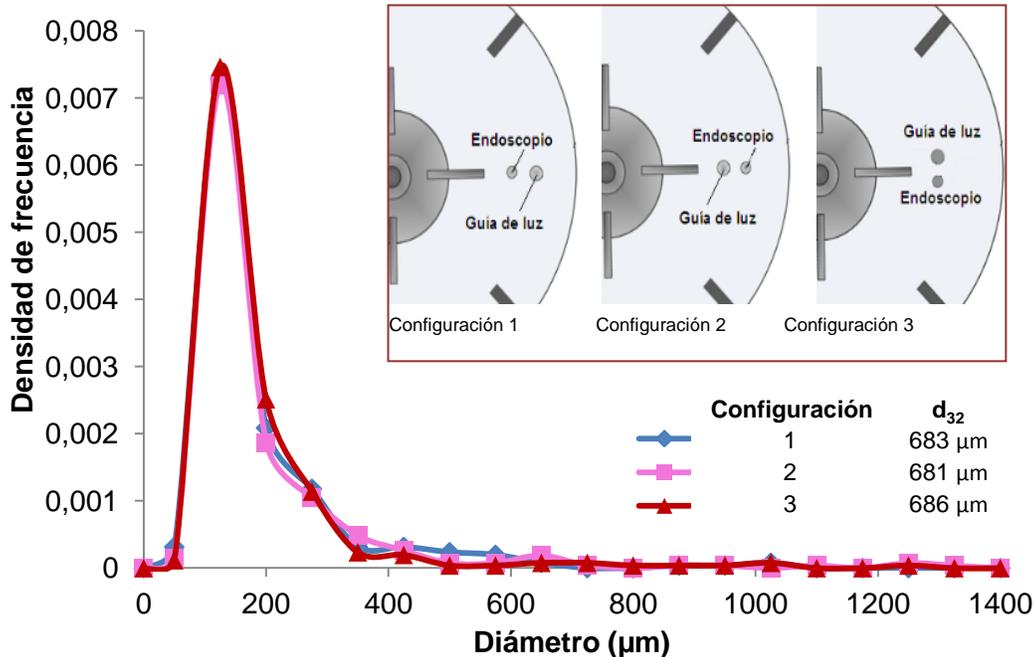


Figura 7.6-1. Distribución de diámetros de burbujas de las tres configuraciones evaluadas.

7.7. Reproducibilidad de las mediciones

Se obtuvieron videos para los análisis de imágenes en cinco diferentes zonas del tanque (Figura 6.4-2) y para los dos medios bifásicos y un medio trifásico antes descritos (sección 6.2). Se realizaron dos experimentos para cada sitio y para cada medio, bajo condiciones de operación similares con la finalidad de obtener datos para la construcción de distribuciones poblacionales y parámetros estadísticos que nos pudieran indicar si existe reproducibilidad de los experimentos desarrollados.

Se compararon los parámetros estadísticos y distribuciones poblacionales obtenidas para los experimentos realizados bajo las mismas condiciones mediante el método Turkey-Kramer ($\alpha=0.05$). En todos los casos se encontró que no existe diferencia significativa entre las pruebas. Con estos resultados se puede confirmar que existe reproducibilidad en los resultados obtenidos con la técnica de videoendoscopia acoplada a una cámara de alta velocidad, para la medición de diámetros de burbujas de aire y de gotas de aceite en procesos multifásicos.

En la Figura 7.7-1 se muestra la gráfica de las distribuciones de diámetros de gotas de aceite obtenidas en un sistema trifásico, en el punto cercano a la pared

del tanque (A). El diámetro Sauter obtenido en cada caso es de 677 μm y 700 μm . De acuerdo a la figura (Figura 7.7-1) se observa que no existe diferencia significativa entre los dos experimentos realizados bajo las mismas condiciones y por lo tanto, los resultados obtenidos son reproducibles. Del mismo modo, en la Figura 7.7-2 se muestran las distribuciones de diámetros de gotas de aceite de un sistema trifásico, en un punto cercano al impulsor (B). Los diámetros Sauter obtenidos fueron de 714 μm y 711 μm . En este caso tampoco se encontró diferencia significativa entre las pruebas.

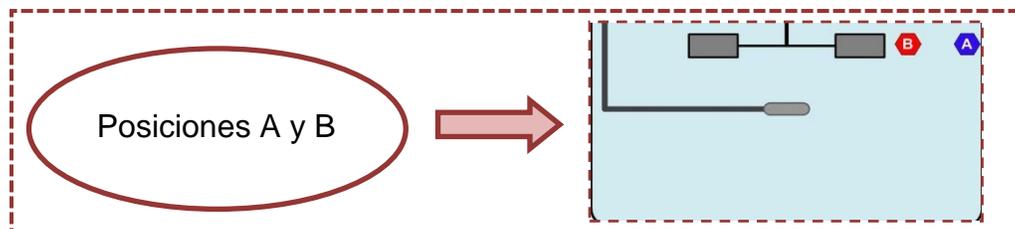
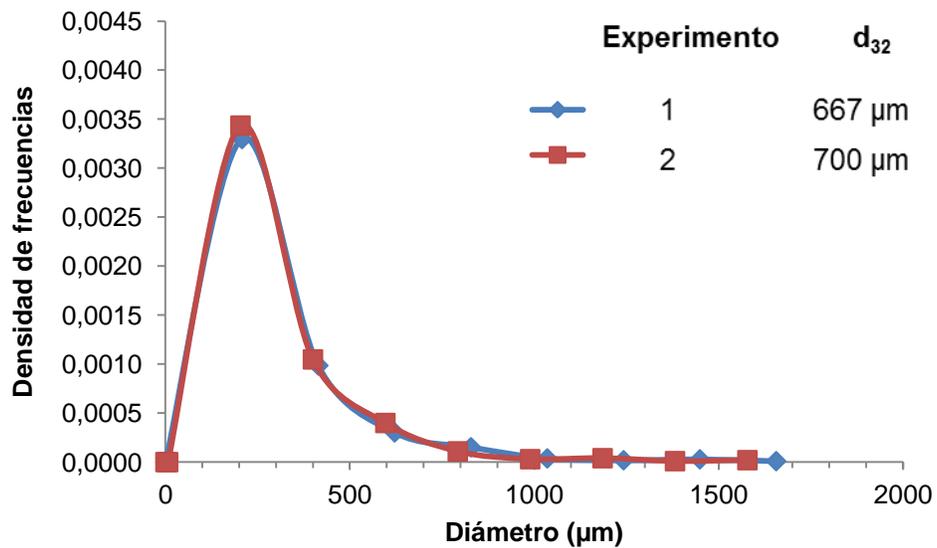


Figura 7.7-1. Reproducibilidad de la medición de la distribución de diámetros de gotas de aceite en sistema trifásico. Posición A, potencia: 0.25 kW/m^3 , aireación: 0.25 vvm, fase dispersa: 5% v/v.

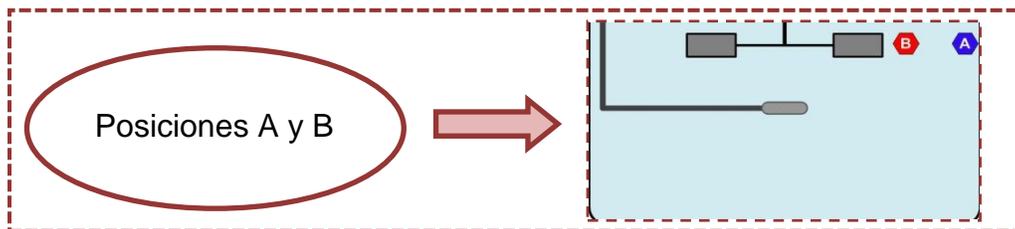
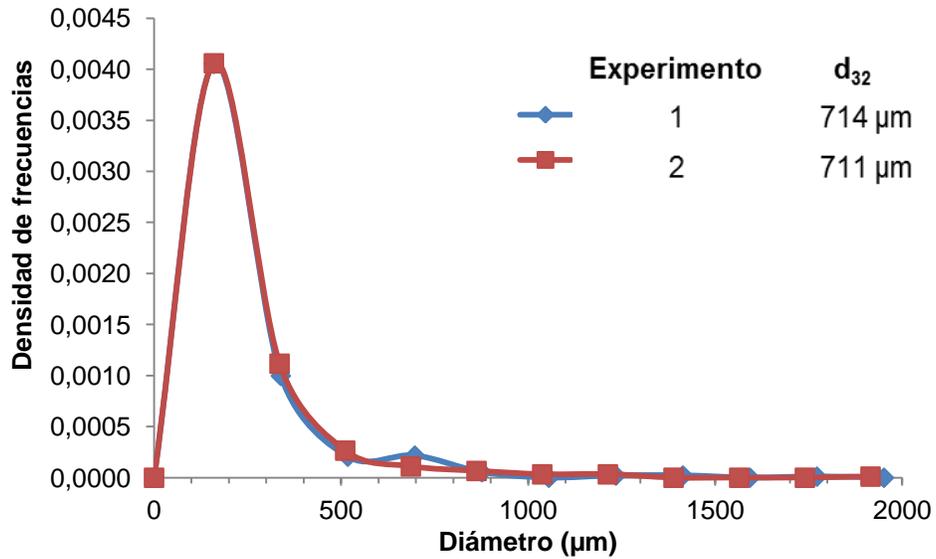


Figura 7.7-2. Reproducibilidad de la medición de diámetros de gotas de aceite en sistema trifásico. Posición B, potencia: 0.25 kW/m^3 , aireación: 0.25 vvm , fase dispersa: $5\% \text{ v/v}$.

En las Figura 7.7-3 y Figura 7.7-4 se muestran las distribuciones de los diámetros de burbujas de aire en un sistema trifásico, obtenidas dentro del tanque de mezclado en las posiciones A y B, respectivamente. En el caso de las distribuciones obtenidas en la posición A, los diámetros Sauter fueron de $442 \mu\text{m}$ y $445 \mu\text{m}$. En el caso de las distribuciones obtenidas en la posición B, los diámetros Sauter correspondientes fueron de $269 \mu\text{m}$ y $285 \mu\text{m}$. Al igual que en el caso anterior, se realizó una prueba de comparación de distribuciones encontrando que no existe diferencia significativa, por lo que las mediciones son reproducibles siguiendo la metodología propuesta en este trabajo.

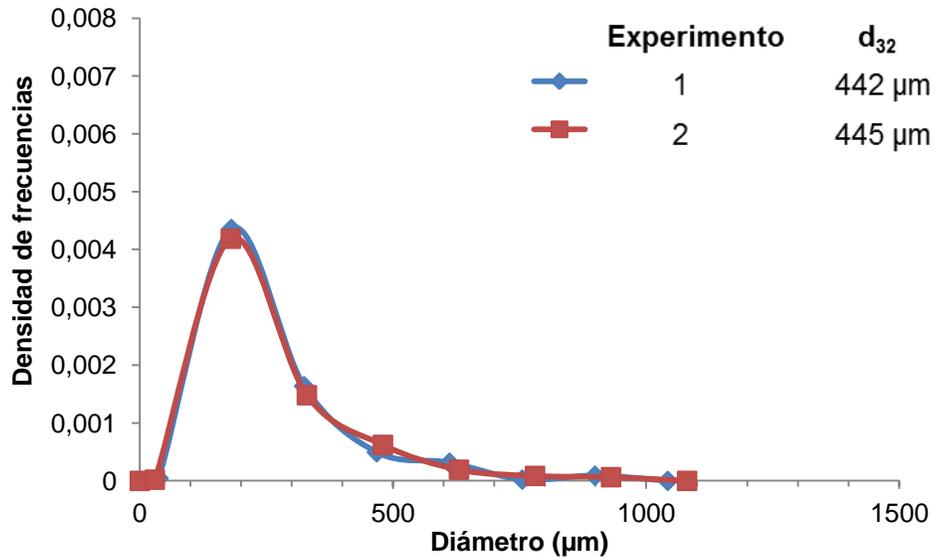


Figura 7.7-3. Reproducibilidad de la medición de la distribución de diámetros de burbujas en sistema trifásico. Posición A, potencia: 0.25 kW/m^3 , aireación: 0.25 vvm , fase dispersa: $5\% \text{ v/v}$.

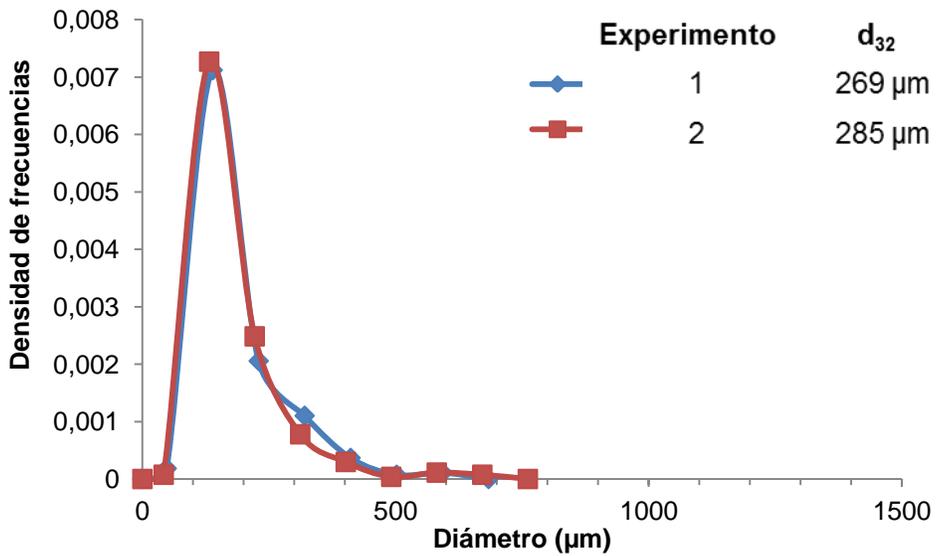


Figura 7.7-4. Reproducibilidad de la medición de la distribución de diámetros de burbujas en sistema trifásico. Posición B, potencia: 0.25 kW/m^3 , aireación: 0.25 vvm , fase dispersa: $5\% \text{ v/v}$.

7.8. Sistema bifásico líquido - líquido

Se realizaron pruebas de análisis de imágenes con el objetivo de evaluar el mezclado de un sistema bifásico líquido-líquido dentro del tanque agitado de escala laboratorio. Se obtuvieron videos utilizando el sistema de videoendoscopia acoplado a una cámara de alta velocidad y se midieron los diámetros de las gotas de aceite. Los puntos evaluados fueron descritos y son los que se ilustraron anteriormente (Figura 6.4-2).

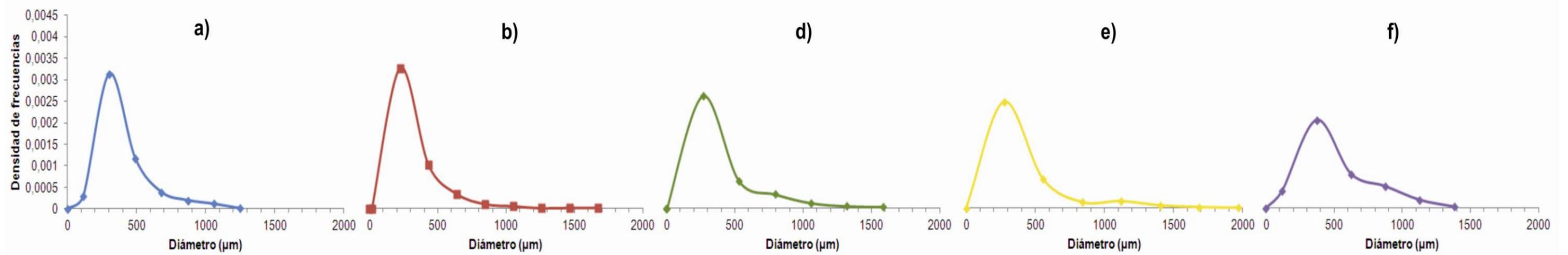
Los resultados obtenidos para cada uno de los puntos evaluados se muestran en la Figura 7.8-1-I. Asimismo, los diámetros Sauter para cada punto se incluyen en la Figura 7.8-2. La distribución de diámetros de gotas de aceite en la zona cercana al impulsor del tanque (B), es una distribución “*long tail distribution*” (Zhou y Kresta, 1998b). Este tipo de distribución se presenta con un pico muy alto en la zona que corresponde a los diámetros de menor tamaño, mientras que en la zona de los diámetros de mayor tamaño, se observa distribución con una larga cola. El mismo comportamiento se observa para las zonas D y E. En el caso de la distribución obtenida en la zona cercana a la flecha del impulsor (F), se observa que el pico se encuentra en la zona de los diámetros menores y tiene menor altura en comparación a las distribuciones de diámetros de los otros sitios evaluados. También, se observa en este sitio (F) una distribución más amplia con respecto a las otras zonas evaluadas. La distribución de diámetros generada en la zona cercana al impulsor (B) (Figura 7.8-1 I) presenta un pico alrededor de los diámetros de $\sim 200 \mu\text{m}$, mientras que en la zona cercana a la pared del tanque (A), el pico se presenta alrededor de los diámetros de $300 \mu\text{m}$ y con una menor altura respecto al punto B. Esto indica que el diámetro que se presenta con mayor frecuencia en las mediciones cercanas a la pared del tanque es mayor que el del punto cercano al impulsor. Por lo tanto, se concluye que en la zona cercana al impulsor (B), se encuentran objetos más pequeños y en mayor cantidad, que en la zona (A), cercana a la pared del tanque. Las distribuciones en las zonas E y D son muy parecidas a la encontrada en la zona cercana a la pared del tanque, lo que nos indica características similares de dispersión entre los sitios A, D y E.

En el caso del punto F (Figura 7.8-1 I), se obtuvo una distribución más amplia y con una menor altura, el pico de la distribución se encuentra en los diámetros $\sim 400 \mu\text{m}$ y la amplitud de la distribución nos indica la presencia de gotas de diferentes tamaños alcanzando diámetros de hasta $\sim 1200 \mu\text{m}$. Asimismo, la cola larga de la distribución indica una alta probabilidad de encontrar objetos de diámetros mayores a $600 \mu\text{m}$.

En la Figura 7.8-2 se presentan los diámetros Sauter de las gotas de aceite obtenidos en las cinco zonas evaluadas. Se observa que este diámetro varía entre 550 y $890 \mu\text{m}$. El valor más pequeño corresponde a la zona cercana al impulsor, lo que indica una mayor área de transferencia de masa respecto a otras zonas del tanque. Esto se confirmó por medio de una prueba de comparación de distribuciones, la cual indica que existe diferencia significativa ($\alpha = 0.05$) entre la zona cercana al impulsor del tanque de mezclado (B) y las otras zonas (A, D, E y F). Asimismo, se encontró que las distribuciones en las zonas D, E y A, no presentan diferencia significativa entre sí y presentan diferencia significativa con la zona cercana a la flecha del impulsor (B).

Los resultados obtenidos de diámetros de gotas de aceite en el sistema líquido – líquido evaluado indican que el mezclado proporcionado por el tanque agitado no permite obtener un sistema de mezclado homogéneo y que existe una significativa diferencia entre las zonas cercanas del impulsor y las otras zonas dentro del tanque de mezclado. Asimismo, relacionando la distribución de diámetros y los d_{32} (obtenidos experimentalmente) con el área de transferencia de las gotas presentes en el tanque (Zhou y Kresta, 1998b), encontramos que existe una transferencia de masa más eficiente en las zonas cercanas al impulsor en comparación a las otras zonas del tanque lo que podría implicar problemas en el diseño y en el escalamiento de procesos.

(I) Distribución de diámetros de gotas de aceite



(II) Distribución de diámetros de burbujas de aire

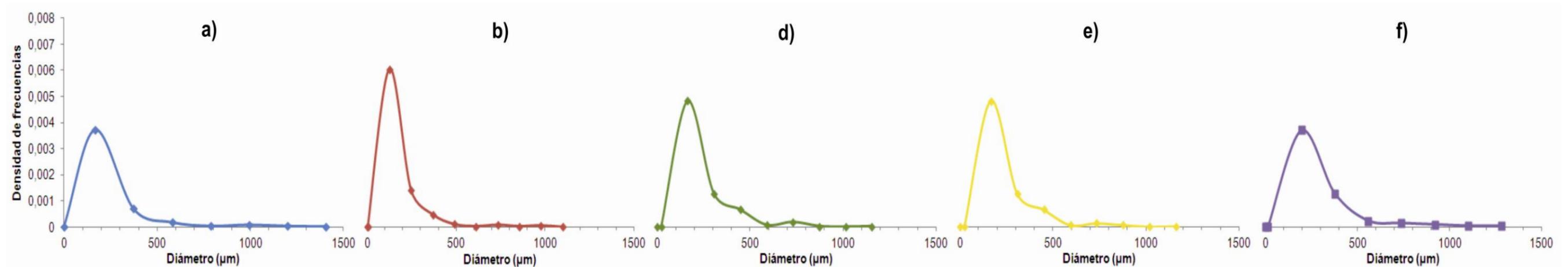
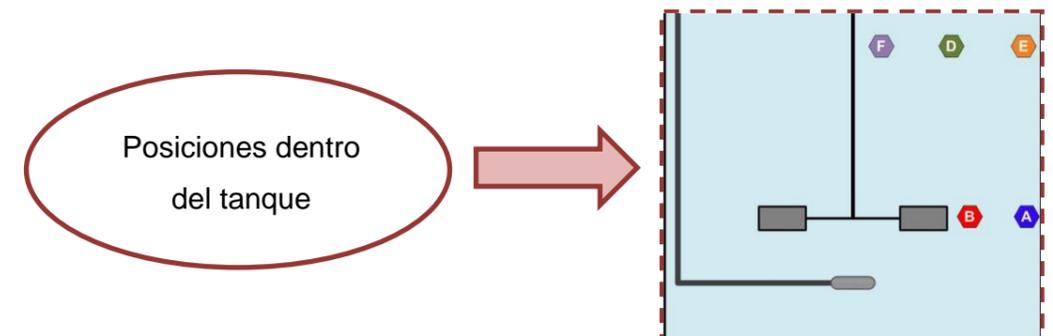


Figura 7.8-1. Distribución de (I) diámetros de gotas de aceite, sistema líquido - líquido, $P=0.25\text{kW/m}^3$, 5% v/v aceite. (II). Diámetros de burbujas de aire, sistema líquido - gas, $P=0.25\text{kW/m}^3$, 0.25 vvm. Las letras en paréntesis indican la posición dentro del tanque (Figura 6.4-2). (a) Posición A (b) Posición B (d) Posición D (e) Posición E y (f) Posición F.



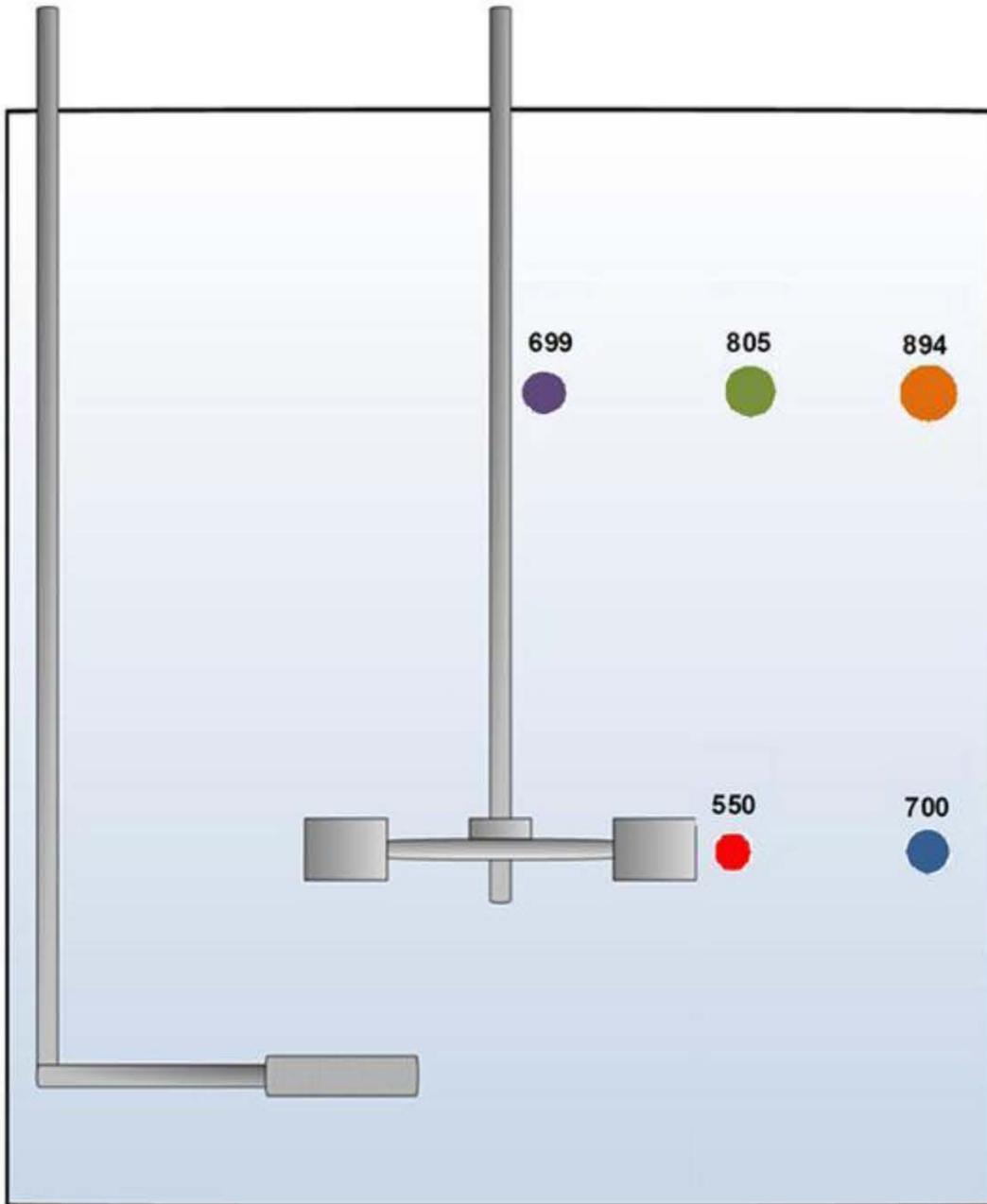


Figura 7.8-2. Diámetros Sauter (μm) de gotas de aceite, obtenidos en el sistema líquido - líquido. $P: 0.25\text{kW/m}^3$, 5% v/v aceite. Los tamaños de los símbolos son proporcionales a los valores de diámetro Sauter.

7.9. Sistema bifásico líquido – gas

En la Figura 7.8-1 II y Figura 7.9-1 se muestran las distribuciones y los diámetros Sauter, respectivamente, de las burbujas de gas en un sistema líquido-gas, medidos en las diferentes zonas de análisis seleccionadas.

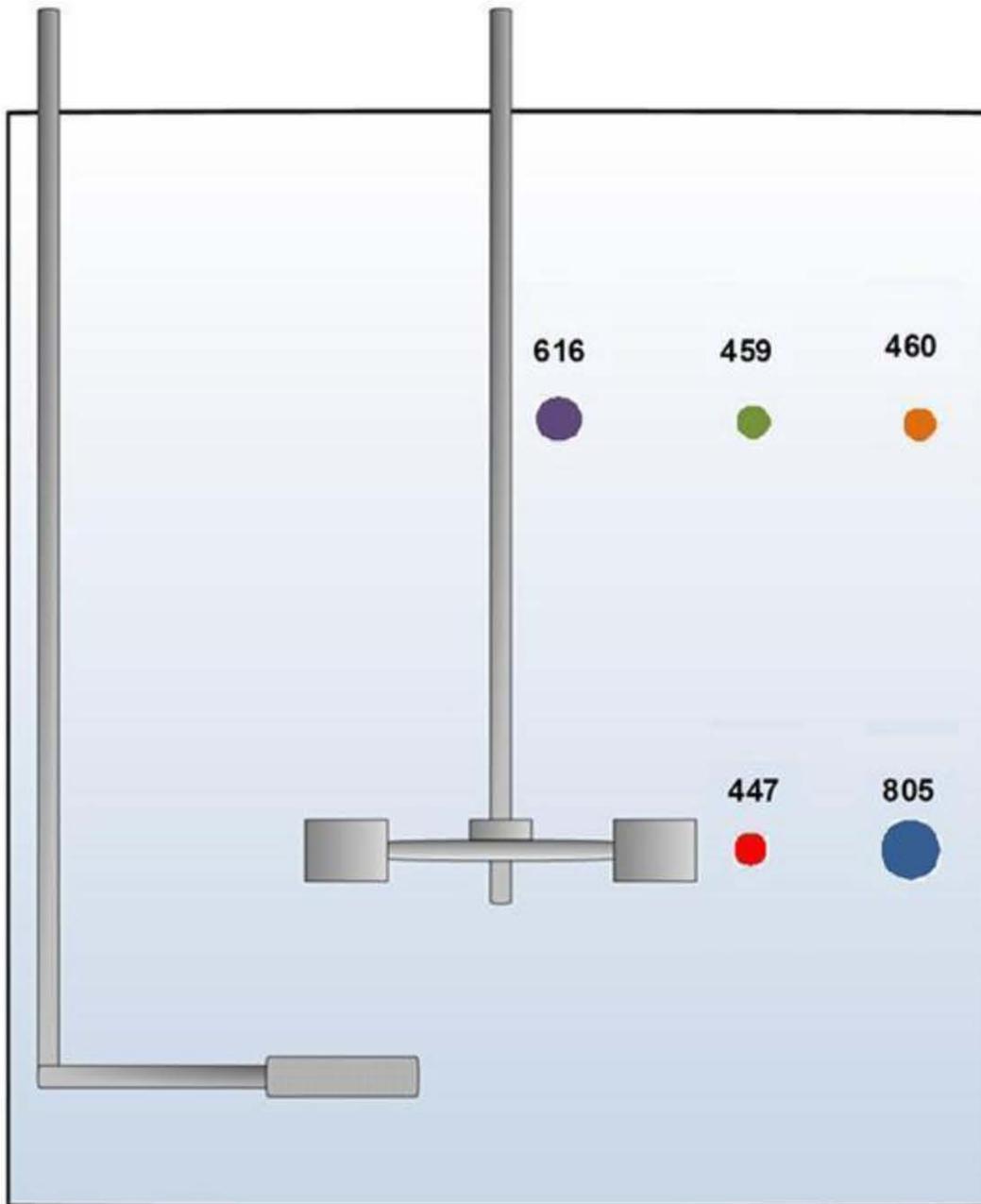


Figura 7.9-1. Diámetros Sauter (μm) de burbujas de aire, obtenidos en el sistema líquido – gas. P : 0.25 kW/m^3 . Velocidad de flujo de gas 0.25 vvm . Los tamaños de los símbolos son proporcionales a los valores de diámetro Sauter.

En las distribuciones de diámetro de burbujas de aire se aprecia que, en todos los casos se presenta una distribución de tipo “*long tail*” (Zhou y Kresta, 1998b). El pico alto de las distribuciones corresponde al diámetro más pequeño que se presenta con mayor frecuencia, se encuentra en el intervalo de diámetros alrededor de 150 μm , encontrando variación en la altura (densidad de frecuencia) de la distribución, es decir, la frecuencia con la que se localizan dichos objetos. La diferencia entre las distribuciones, además de la altura del pico alto de la gráfica, está en la longitud y altura de la cola de las distribuciones después de los diámetros de 200 μm , lo que indica una presencia considerable de objetos de mayor diámetro respecto a la media y al diámetro promedio. Se puede apreciar que el diámetro que se presenta con mayor frecuencia en cada distribución es similar para todas las zonas evaluadas ($\sim 150 \mu\text{m}$). Sin embargo, en la zona B (cerca del impulsor) es mayor la frecuencia con la que se presenta este diámetro con respecto a las otras zonas, por lo que se presenta mayor cantidad de objetos con menor diámetro con respecto a las otras zonas del tanque de mezclado que se evaluaron. Esto indica una mayor área interfacial producida por una mayor energía disipada en esta zona, por lo que se puede inferir que existe un mejor mezclado en la zona cercana al impulsor. Lo anterior se comprueba mediante pruebas estadísticas (Tukey-Kramer) realizadas a las distribuciones de diámetros de burbujas de aire donde se encuentra una diferencia significativa entre la distribución obtenida en la zona A (cerca de la pared del tanque) y la zona B (cerca del impulsor). Los diámetros Sauter obtenidos en las burbujas de aire en los sitios evaluados (Figura 7.9-1) presentan el mismo comportamiento que las distribuciones, al presentar un menor diámetro promedio en el sitio cercano al impulsor con respecto al sitio cercano a la pared del tanque y a los otros sitios evaluados dentro del tanque de mezclado.

En lo que respecta a las zonas D y E, no existe diferencia significativa entre las distribuciones pero, sí existe una diferencia significativa con las zonas A y B. En el caso de la zona F, se vuelve a encontrar que es una zona que presenta una baja dispersión con respecto a las otras zonas del tanque evaluadas en este trabajo ya

que, al estar cerca de la flecha del sistema de agitación, existe una acumulación de gas en forma de grandes burbujas que desplazan el medio líquido y evita que se mezcle y distribuya el aire en el medio líquido dentro de esta zona (Takahashi y Nienow, 1993; Galindo *et al.*, 2000).

7.10. Sistema trifásico líquido – líquido – gas

En la Figura 7.10-1 se presentan los diámetros Sauter de las gotas de aceite y de las burbujas de aire para las diferentes zonas evaluadas. En el caso de las burbujas de aire, en la posición A y B se observan las mismas tendencias observadas en el sistema líquido – gas. Los valores de diámetros medidos entre las posiciones D y E son muy cercanos por lo que las distribuciones no muestran diferencia significativa, lo que se confirma a través del análisis estadístico realizado a las distribuciones obtenidas (Tukey-Kramer; $\alpha=0.05$). Sin embargo, en el caso de las gotas de aceite, la tendencia cambia, ya que no existe diferencia entre los diámetros Sauter de las zonas A y B. En ambos casos (gotas y burbujas), se observa un diámetro mayor en la posición F respecto a los diámetros encontrados en las demás posiciones evaluadas.

Existen trabajos que han evaluado la zona cercana a la pared del tanque (Guevara, 2008; Galindo *et al.*, 2000) y otros que evaluaron distintas zonas del tanque de mezclado, utilizando diferentes sistemas de agitación (Laakkonen *et al.*, 2005a y c) y diferentes condiciones de operación, en sistemas líquido–gas.

Laakkonen *et al.*, (2005 a y c) reportaron diámetros Sauter de burbuja para un sistema líquido – gas (agua – aire) entre 2.3 y 3.3 mm, en las zonas cercanas a la pared del tanque. Sin embargo, utilizaron un tanque de 0.260 m de diámetro, 340 rpm y velocidades de aireación de 0.072 vvm. Los autores emplearon condiciones experimentales diferentes a las usadas en este trabajo. Se encontraron diámetros de burbujas de 1.7 mm en una zona cercana al impulsor. Las tendencias de diámetros menores en las zonas cercanas al impulsor del tanque que se reportan por Laakkonen *et al.*, (2005 a y c) (por simulación y experimentación) son similares a las encontradas en los resultados experimentales del presente trabajo. Asimismo, la diferencia de los diámetros

entre las distintas zonas del tanque (en proporción) es comparable al que se encontró en este trabajo.

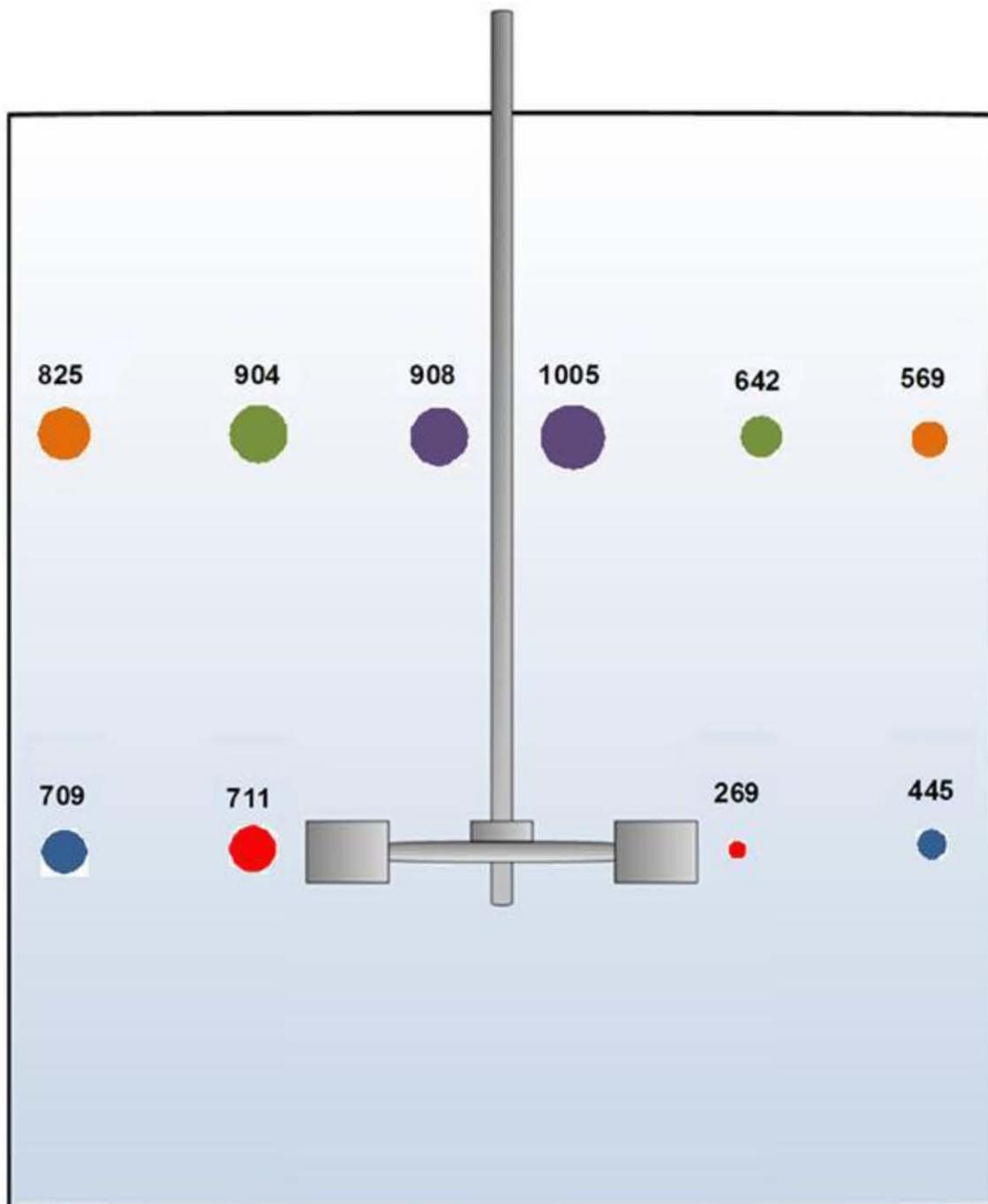


Figura 7.10-1. Diámetros Sauter (μm), de gotas y burbujas, obtenidos en el sistema trifásico en diferentes zonas dentro del tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm , $5\% \text{ v/v}$ de aceite. Izquierda, d_{32} de gotas. Derecha, d_{32} de burbujas. Los tamaños de los símbolos son proporcionales a los valores de diámetro Sauter.

En la Figura 7.10-2 se muestran las distribuciones de diámetros de gotas de aceite obtenidas en el sistema trifásico. Se observa que las distribuciones, en todos los casos, vuelven a ser del tipo “*long tail*” presentando un pico alrededor de 200 μm de diámetro, con excepción del sitio F, donde se presenta alrededor de 300 μm de diámetro. Las distribuciones muestran que, si bien el diámetro de gota que se encuentra con mayor frecuencia en la dispersión es aproximadamente el mismo, la frecuencia con el que este se presenta es diferente, presentándose mayor frecuencia en el sitio cercano al impulsor y la menor frecuencia en el sitio cercano a la flecha del sistema de mezclado. Asimismo, las distribuciones obtenidas en los sitios A, D, E y F presentan una mayor amplitud respecto al sitio B, lo que evidencia que no existe homogeneidad dentro del tanque de mezclado.

Como se pudo observar, existe una diferencia significativa en las distribuciones entre la zona A y B, y en el caso de la zona D y E, contrario a lo observado en el sistema líquido-líquido, existe una diferencia significativa entre las distribuciones, así como con las distribuciones de las zonas A y B ($\alpha = 0.05$). Esto indica una mayor área de transferencia de masa en la zona de descarga del impulsor y a su vez en la cercanía al impulsor del tanque de mezclado.

La Figura 7.10-3 muestra la gráfica con las distribuciones de diámetros de burbujas de aire en un sistema trifásico líquido-líquido-gas. Las distribuciones de las zonas A, B, D y E son del tipo “*long tail*” y presentan un pico entre los $\sim 150 \mu\text{m}$ y $\sim 200 \mu\text{m}$. Sin embargo, al igual que en los sistemas anteriores se encuentra una diferencia en la frecuencia con la que se presentan los objetos con menor diámetro y en la amplitud de las distribuciones. El sitio B presenta una frecuencia mayor con respecto a los otros sitios, asimismo, los sitios A, D y E presentan burbujas de diámetros diversos y con una frecuencia menor con respecto al sitio B. Esto evidencia que no existe homogeneidad en el tanque de mezclado. En el caso de la zona F, se presenta una distribución con diámetros más grandes, lo cual se atribuye al efecto de acanalamiento debido a la lejanía de la zona de mayor dispersión de energía.

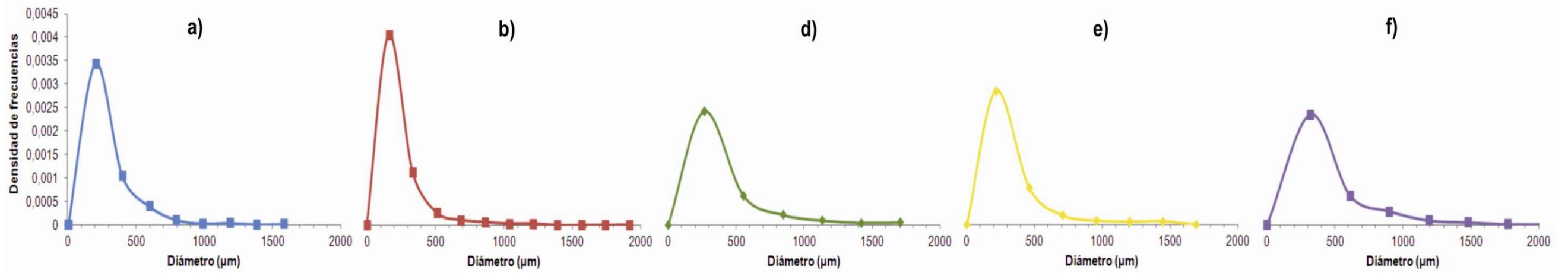


Figura 7.10-2. Distribución de diámetros de gotas en un sistema trifásico en función de la posición espacial dentro de un tanque de mezclado. $P=0,25 \text{ kW/m}^3$, $0,25 \text{ vvm}$, $5\% \text{ v/v}$ de aceite. Las letras en paréntesis indican la posición dentro del tanque (Figura 6.4-2, pág. 28). (a) Posición A (b) Posición B (d) Posición D (e) Posición E y (f) Posición F.

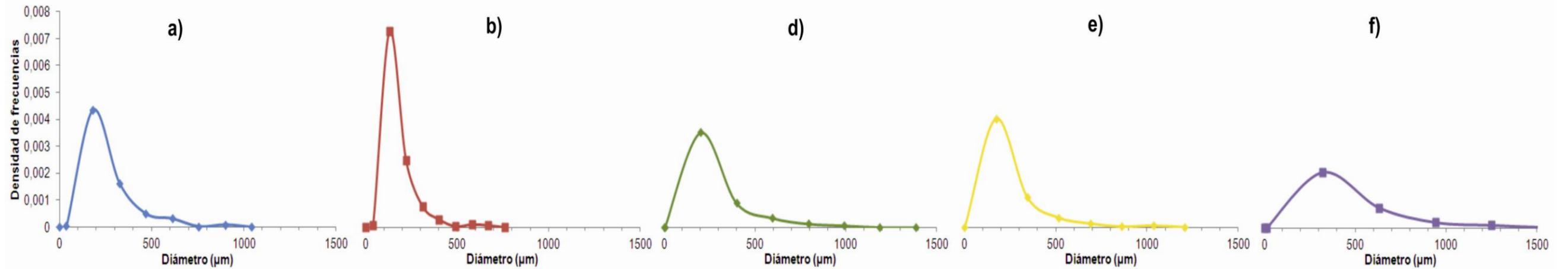
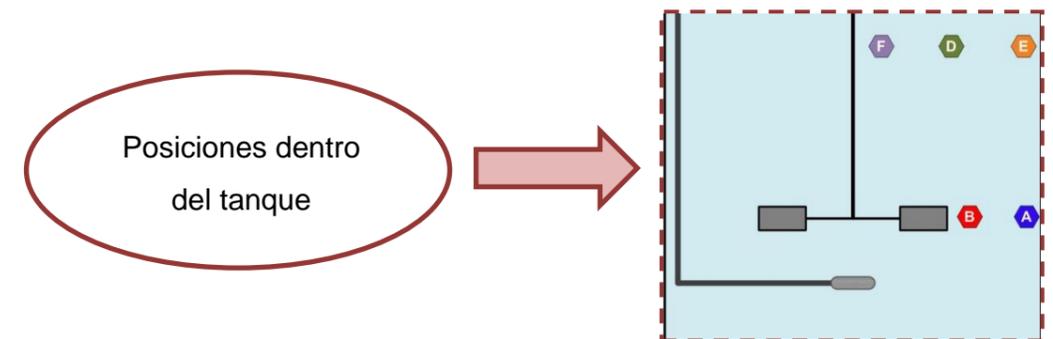


Figura 7.10-3. Distribución de diámetros de burbujas de aire en un sistema trifásico en función de la posición espacial dentro de un tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm , $5\% \text{ v/v}$ de aceite. Las letras en paréntesis indican la posición dentro del tanque (Figura 6.4-2). (a) Posición A (b) Posición B (d) Posición D (e) Posición E y (f) Posición F.



Las diferencias presentes en las distribuciones de diámetros de burbujas entre los sitios evaluados se comprueban mediante análisis estadístico (Tukey-Kramer), el cual mostró que hay una diferencia significativa entre las zonas del tanque A y B, la cual también se observa en los diámetros Sauter. La distribución de diámetros de burbujas en los sitios D y E, también presentan diferencia significativa ($\alpha=0.05$). Evaluando el sitio A con respecto al sitio E se observa una similitud que no se presentó en los sistemas líquido-líquido y líquido-gas.

Con los datos obtenidos en el sistema bifásico se muestra que, por lo general los diámetros de las gotas y las burbujas son menores en las zonas donde se ha reportado que existe una mayor disipación de energía (Ng y Yianneskis, 2000; Kerdouss *et al.*, 2005). Por tanto, se puede inferir que las áreas interfaciales se incrementan en las zonas de mayor energía disipada localmente en las distintas posiciones del tanque de mezclado como se había reportado por (Markopoulos *et al.*, 2000; Laakkonen *et al.*, 2005a y b; Takahashi y Nienow 1993; Ng y Yianneskis, 2000; Kerdouss *et al.*, 2005).

En la Figura 7.10-4 se reproduce el gráfico de distribución de energía en un tanque agitado mecánicamente de 0.003 m^3 , obtenida por simulación computacional (CFD) en un estudio realizado por Ng y Yianneskis (2000). Este estudio se realizó simulando un medio líquido – líquido y se encontró que la zona cercana al impulsor del tanque de mezclado tiene una mayor disipación de energía con respecto a las otras zonas del tanque. Esto produce que el equilibrio entre el rompimiento y la coalescencia de las gotas se vea modificado ocasionando un mayor rompimiento y por tanto, gotas de menor diámetro en la zona cercana al impulsor. Asimismo, en la Figura 7.10-5 se muestran los resultados obtenidos en un sistema líquido – gas, por medio de simulación computacional (CFD), realizada por Kerdouss *et al.*, (2005). Se observa que las burbujas que presentan los diámetros más pequeños se encuentran en la descarga del impulsor, donde los *eddies* pueden romper dichos objetos y disminuir su diámetro. También se observa que fuera de las zonas de descarga del impulsor, el diámetro de las burbujas aumenta debido a que la baja disipación de energía permite una

acumulación de gas que favorece la coalescencia de las burbujas en estas zonas. Por lo tanto, los resultados obtenidos en el presente trabajo son consistentes con el comportamiento de la fase líquida y gaseosa, respectivamente, en las distintas zonas del tanque de mezclado, obtenido mediante simulación computacional.

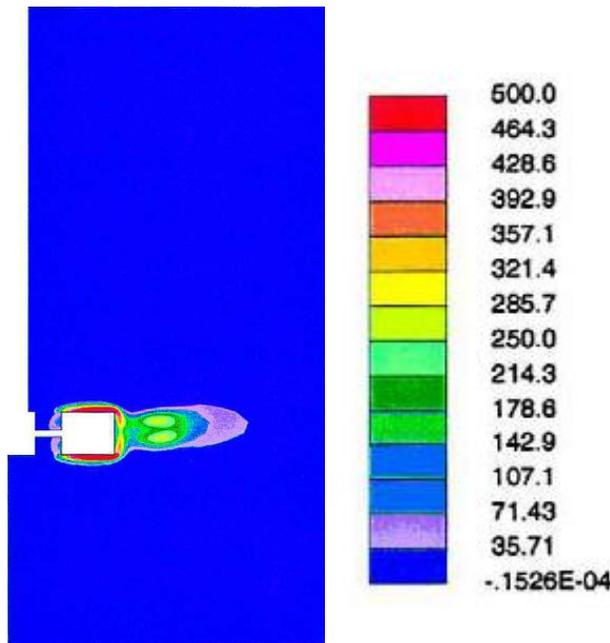


Figura 7.10-4. Gráfico de dispersión de energía en un tanque agitado m^2s^{-3} (Ng y Yianneskis, 2000).

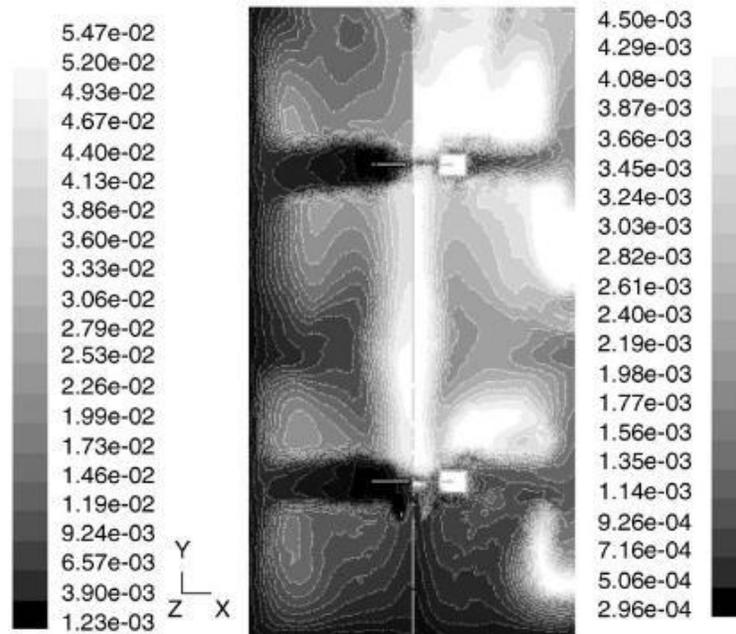


Figura 7.10-5. Izquierda: Contornos de *turbulent length scale* calculada (m); Derecha: Contorno de diámetros de burbujas entre dos baffles (m) (Kerdouss et al., 2005)

En la Figura 7.10-6 se muestran las gráficas correspondientes para cada zona analizada dentro del tanque de mezclado. Cada gráfico presenta una distribución identificada con la letra que representa la zona estudiada y la leyenda “Bifásico” para referirse al sistema líquido–líquido o la leyenda “Trifásico” para hacer referencia al sistema trifásico líquido–líquido–gas. En éstas se observa que en lo general, la adición de aire al sistema disminuye los diámetros de las gotas de aceite, aumentando la transferencia de masa debido a una mayor área interfacial y por tanto, mejorando la calidad del mezclado respecto al sistema bifásico presente en el tanque de mezclado bajo las condiciones estudiadas en este trabajo. Esto tiene relación con lo que se encuentra reportado en la literatura (McMillan y Wang, 1987; Rols y Goma, 1991). Sin embargo, existen otros trabajos que reportan un efecto negativo de la aireación sobre la dispersión de gotas de aceite (Lucatero *et al.*, 2003; Wong y Shiuan, 1986; Nienow *et al.*, 1998; Galindo *et al.*, 2000), siendo en la mayoría de los casos reportes con diferentes fases continuas, fases dispersas, sistemas y condiciones de agitación.

Finalmente, se observa que el efecto positivo (disminución del diámetro y por tanto aumento en el área de transferencia) en la dispersión de gotas de aceite causado por la presencia de aire es mayor en la zona en la cual se libera mayor energía al sistema, es decir, la zona más cercana al impulsor, donde se observa el mayor efecto (Figura 7.10-6). Esto indica que la cercanía con la zona donde se disipa la mayor cantidad de energía tiene un efecto directo en la dispersión de aceite.

Asimismo, en la Figura 7.10-7 se muestran las distribuciones encontradas en el sistema bifásico (antes de añadir aceite al sistema) y trifásico (después de añadir aceite al sistema). Se puede observar que, en los sitios que se localizan a la altura de la descarga del impulsor, es decir, la zona cercana a la pared del tanque (A) y la zona cercana al impulsor (B), se presenta una disminución de los diámetros de burbujas de aire con respecto a los diámetros encontrados en las otras zonas evaluadas, esto es, una distribución que indica la presencia de una mayor cantidad de objetos de menor diámetro. Por último, en las zonas que se encuentran por encima de la descarga del impulsor (D y E) se observa que la

presencia de aceite causó un aumento en los diámetros de las burbujas de aire. Por lo tanto, la presencia de una fase líquida inmiscible disminuye la transferencia de masa del aire en estas zonas al afectar el área superficial de las burbujas de aire. Este comportamiento se observa también al comparar los diámetros Sauter obtenidos en el sistema bifásico y trifásico (Figura 7.9-1 y Figura 7.10-1).

Los datos presentados indican que el efecto causado por la fase dispersa (aceite) sobre la dispersión de burbujas de aire en un sistema líquido – gas, depende de la cercanía con la zona donde se presenta la mayor cantidad de energía disipada en el tanque de mezclado. En las zonas donde se ha reportado en la literatura que existe menor disipación de energía, como son la zona cercana a la pared del tanque y las zonas que se encuentran por encima de la descarga del impulsor (Ng y Yianneskis, 2000; Zhou y Kresta, 1998b), se presentó en general un efecto que aumenta el tamaño de los diámetros de aire con respecto la zona B en el tanque de mezclado. Sin embargo, en la zona cercana al impulsor (reportada en la literatura como la de mayor disipación de energía) se encontraron menores diámetros de los objetos y por tanto una mayor área de transferencia de gotas de aceite que en las otras zonas evaluadas.

El efecto observado sobre la dispersión en la zona cercana al impulsor (de mayor energía disipada) puede ser causado por la presencia de una mayor cantidad de gotas de aceite de menor diámetro en las zonas de mayor energía que impiden o limitan la coalescencia de las burbujas de aire en esta zona (Nienow, 1998). Estas gotas, al pasar a una zona de menor energía aumentan su tamaño, permitiendo así que las burbujas de aire puedan coalescer y aumentar su tamaño conforme se alejan del impulsor. Se sabe que la concentración de aceite no tiene impacto sobre la energía global disipada (Serrano-Carreón *et al.*, 1997); sin embargo, el rompimiento controla el tamaño de las burbujas en la región cercana al impulsor, mientras que la coalescencia lo hace en el resto del tanque (Laakkonen *et al.*, 2005a).

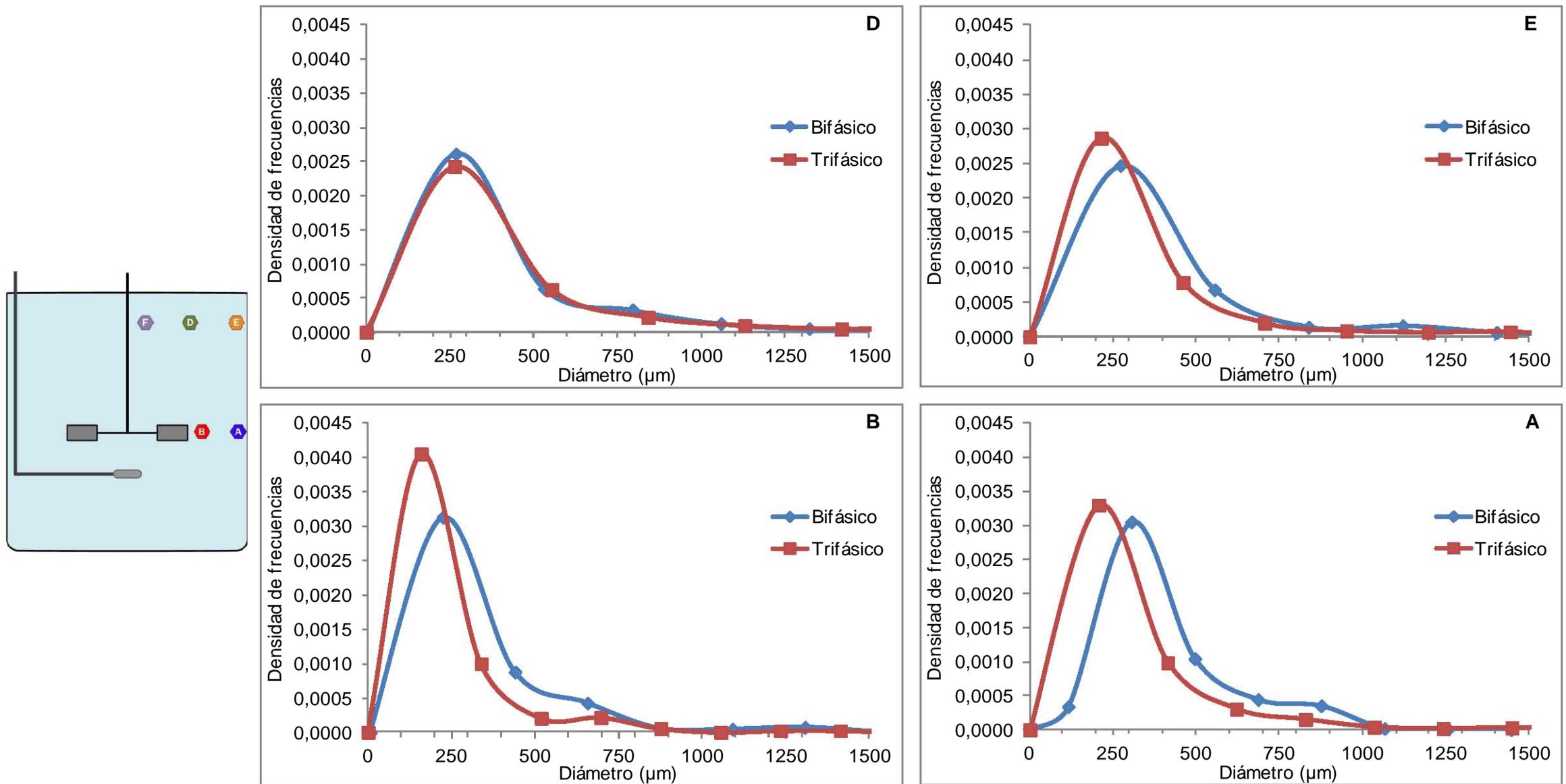


Figura 7.10-6. Distribución de gotas de aceite en un sistema de dos y tres fases en diversas zonas dentro de un tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm , $5\% \text{ v/v}$ de aceite

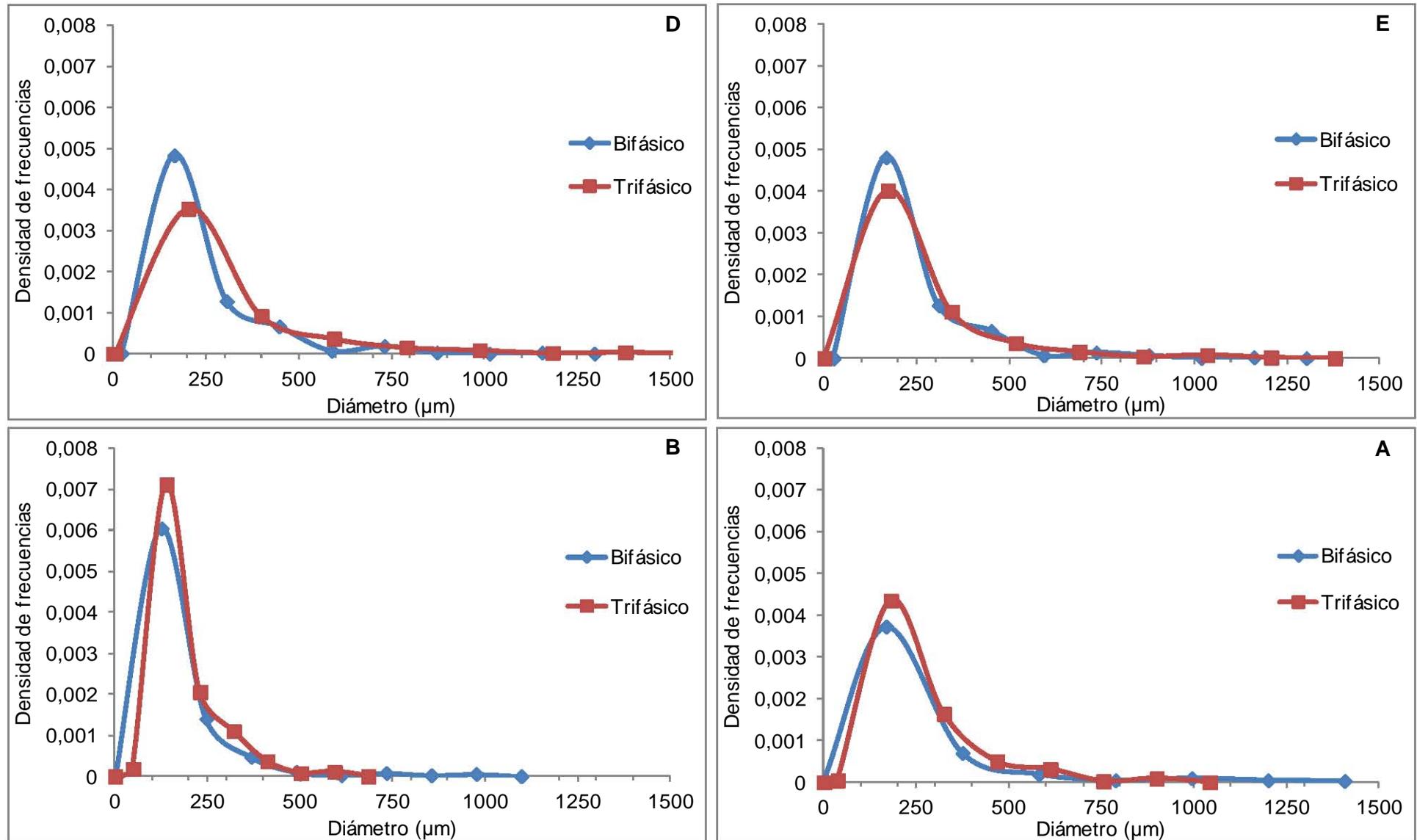
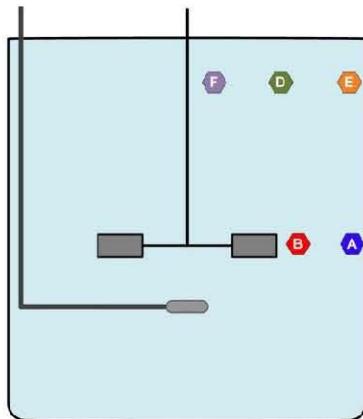


Figura 7.10-7. Distribución de burbujas de aire en un sistema de dos y tres fases en diversas zonas dentro de un tanque de mezclado. $P=0.25 \text{ kW/m}^3$, 0.25 vvm , $5\% \text{ v/v}$ de aceite.

8. CONCLUSIONES

- Las condiciones de iluminación para obtener videos de alta velocidad por medio de un endoscopio, son fundamentales para poder realizar análisis de imágenes. La iluminación por medio de una fuente de arco Xenón de 180 W transmitida a través de una guía de luz y colocada frente a la lente del endoscopio, fue la opción más viable y que generó los mejores resultados.
- El sistema de videoendoscopía acoplado a una cámara de alta velocidad permitió la evaluación del diámetro Sauter y la distribución de diámetros de gotas y burbujas en dos sistemas bifásicos y uno trifásico. Los resultados mostraron una alta reproducibilidad, comprobándose (por medio de la prueba de Turkey-Kramer para la comparación de distribuciones) que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones construidas con los datos muestreados bajo las mismas condiciones. El error obtenido fue menor a 10 %, siendo similar al reportado por otras técnicas de análisis de imágenes.
- Se demostró que existe diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de diámetros de gotas de aceite y burbujas de aire en los tres sistemas evaluados en este trabajo (líquido-líquido, líquido-gas y trifásico) en las distintas zonas del tanque de mezclado, aún en sistemas de escala laboratorio. La zona cercana al impulsor fue la que presentó la mayor cantidad de objetos con diámetros de menor tamaño, respecto a los objetos encontrados en otras zonas del tanque de mezclado.
- Se encontró que la aireación produce un efecto en el sistema trifásico que disminuye el tamaño de los diámetros de las gotas de aceite con respecto al sistema líquido – líquido, bajo la misma potencia. Se observó también, que en las zonas en las que se espera una mayor disipación de energía, existe una mayor alteración de la dispersión de gotas de aceite debido a la presencia de la fase gaseosa.
- Se observó que la dispersión de burbujas de aire en un sistema trifásico mejora por la presencia de una segunda fase líquida (inmiscible en el medio), en las zonas donde la literatura ha reportado que existe mayor disipación de energía dentro del tanque de mezclado.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alves, S. S., Maia, C. I., Vasconcelos, J. M. T., Serralheiro, A. J. (2002) Bubble size in aerated stirred tanks, *Chem. Eng. J.* 3990: 1-9.
- Angeli, P., Hewitt, G. F. (2000) Flow structure in horizontal oil-water flow, *Int. J. Multiphase Flow* 26: 1117-1140.
- Angst, R., Kraume, M. (2006) Experimental investigations of stirred solid/liquid systems in three different scales: Particle distribution and power consumption, *Chem. Eng. Sci.* 61: 2864-2870.
- Ascanio, G., Castro, B., Galindo, E. (2004) Measurement of power consumption in stirred vessels- a review. *Chem. Eng. Res. Des.* 82(A9):1282-1290.
- Baldi, S., Yianneskis, M. (2004) On the quantification of energy dissipation in the impeller stream of a stirred vessel from fluctuating velocity gradient measurements. *Chem. Eng. Sci.* 59: 2659-2671.
- Barigou, M., Greaves, M. (1991) A capillary suction probe for bubble size measurement, *Meas Sci Technol*, 2: 318–326.
- Barigou, M., Greaves, M. (1992a) Bubble-size distributions in a mechanically agitated gas–liquid contactor, *Chem Eng Sci*, 47(8): 2009–2025.
- Barigou, M., Greaves, M. (1992b) Bubble size in the impeller region of a Rushton turbine, *Trans IChemE, Part A, Chem Eng Res Des*, 70: 153–160.
- Brito-Albavera, M. T. (2001) *Montaje de un arreglo experimental basado en análisis de imágenes para la evaluación de dispersiones en sistemas de fermentación*, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México.
- Cents, A. H. G., Brillman, D. W. F., Versteeg, G. F., Wijinstra, P. J., Regtien, P. P. L. (2004) Measuring bubble, drop and particle sizes in multiphase systems with ultrasound, *AIChE J.* 50: 2750-2762.

- Chaouki, J., Larachi, F., Dudukovic, M. P. (1997) Noninvasive tomographic and velocimetric monitoring of multiphase flows. *Ind. Eng. Chem. Res.* (36):4476-4503.
- Clarke, K. G., Correia, L. D. C. (2008) Oxygen transfer in hydrocarbon-aqueous dispersions and its applicability to alkane bioprocesses: a review. *Biochem Eng J.*, 39: 405–29.
- Córdova-Aguilar, M. S. (2003) *Estudio de las dispersiones de aceite, biomasa y aire en un sistema modelo de fermentación tetrafásica*, Tesis de Doctorado en Biotecnología, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Dumont, E., Delmas, H. (2003) Mass transfer enhancement of gas absorption in oil-in-water systems: a review. *Chem. Eng. Process.* 42 (6): 419-438.
- Escudié, R., Liné, A. (2003) Experimental analysis of hydrodynamics in radially agitated tank, *AIChE J.* 49:585-603.
- Galindo, E., Larralde-Corona, C. P., Brito, T., Córdova-Aguilar, M. S., Taboada, B., Vega-Alvarado, L., Corkidi, G. (2005) Development of advanced image-analysis techniques for the characterization of multiphase dispersions occurring in bioreactors, *J. Biotechnol.*, 116: 261-270.
- Galindo, E. (1996) “Fermentadores: Operaciones de Transferencia”, En: *Libro de Notas de V Curso Latinoamericano de Biotecnología*, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile, pp. 157-207.
- Galindo, E., Pacek, A., Nienow, A. (2000) Study of drop and bubble sizes in a simulated mycelial fermentation broth of up to four phases. *Biotechnol. Bioeng.* 69(2): 213-221.
- Greaves, M., Kobbacy, K. A. H. (1984) Measurement of bubble size distribution in turbulent gas-liquid dispersions, *Chem Eng Res Des*, 62: 3–12.

- Guevara, E. (2008) *Desarrollo y aplicación de un sistema de video de alta velocidad para el análisis de dispersiones multifásicas*. Tesis de Maestría en Ciencias Bioquímicas, Instituto de Biotecnología, UNAM.
- Guevara-López, E., San Juan-Galindo, R., Córdova-Aguilar, M. S., Corkidi, G., Ascanio, G., Galindo, E. (2008) High-speed visualization of multiphase dispersions in a mixing tank. *Chem. Eng. Res and Des.* 86(12):1382-1387.
- Kerdouss, F., Bannari, A., Proulx, P. (2005) CFD modeling of gas dispersion and bubble size in a double turbine stirred tank, *Chem. Eng. Sci.* 61: 3313-3322.
- Kulkarni, A.A., Joshi, J.B., Kumar, V.R., Kulkarni, B. D. (2001) Simultaneous measurement of hold-up profiles and interfacial area using LDA in bubble columns: predictions by multiresolution analysis and comparison with experiments, *Chem Eng Sci.*, 56: 6437–6445.
- Laakkonen, M., Honkanen, M., Saarenrinne, P., Aittamaa, J. (2005b) Local bubble size distributions, gas-liquid interfacial areas and gas holdups in a stirred vessel with particle image velocimetry. *Chem. Eng. J.* 109:37-47.
- Laakkonen, M., Moilanen, P., Alopaeus, V., Aittamaa, J. (2007) Modelling local bubble size distributions in a stirred vessel, *Chem. Eng. Sci.* 62: 721-740.
- Laakkonen, M., Moilanen, P., Miettinen, T., Saari, K., Honkanen, M., Saarenrinne, P., Aittamaa, J. (2005c) Local bubble size distributions in agitated vessel comparison of three experimental techniques, *Chem. Eng. Res. Des.* 83: 50-58.
- Laakkonen, M., Moilanen, Aittamaa, J. (2005a) Local bubble size distributions in agitated vessel. *Chem. Eng. J.* 106:133-143.
- Lovick, J., Mouza, A. A., Paras, S. V., Lye, G. J., Angeli, P. (2005) Drop size distribution in highly concentrated liquid-liquid dispersions using a light back scattering method. *J Chem Technol Biotechnol.* 80:545-552.
- Lucatero, S., Larralde-Corona, P., Corkidi, G., Galindo, E. (2003) Oil and air dispersion in a simulated fermentation broth as a function of mycelial morphology. *Biotechnol. Prog.* 19: 285-292

- Maab, S., Wollny, S., Rojahn, J., Paschedag, A. R. and Kraume, M. (2007) Comparison of measurement techniques for drop sizes in highly dispersed and fastly coalescing systems, In: Proceedings International Congress on Particle Technology (PARTEC).
- Markopoulos, J., Kadoglou, E., Papaevangelou, D., Zavitsanou, A. (2000) Regional mean bubble diameters and gas holdup in agitated gas-liquid contactors. *Chem. Eng. Technol.* 23(4): 337-339.
- McMillan, J., Wang, D. (1987) Enhanced oxygen transfer using oil-in-water dispersions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 506: 569–582
- Michel, B. J., Miller, S. A. (1962) Power requirements of gas-liquid agitated systems. *AIChE J.* 8(2): 262-266
- Müdde, R.F., Groen, J. S., Van Den Akker, H. E. A. (1997) Liquid velocity field in a bubble column: LDA experiments, *Chem Eng Sci.*, 52(21/22): 4217–4224.
- Ng, K., Yianneskis, M. (2000) Observations on the distribution of energy dissipation in stirred vessels. *Chem. Eng. Res. and Des.* 78 A, 3: 334-341.
- Nienow, A. W. (1998) Hydrodynamics of stirred bioreactors. *Appl. Mech. Rev.* 55(1): 3-32.
- Ohyama, Y., Endoh, K. (1955) Power characteristics of gas-liquid contacting mixers. *Chem. Eng Japan* 19, 2-11.
- Pacek, A. W., Mann, C. C., Nienow, A. W. (1998) On the Sauter mean diameter and size distributions in turbulent liquid/liquid dispersions in a stirred vessel. *Chem. Eng. Sci.* 53(11): 2005-2011.
- Ramkrishna, D., Sathyagal, A., Narsimhan, G. (1995) Analysis of dispersed – phase systems: a fresh perspective. *AIChE J.* 41(1):35-44.
- Reséndiz, R., Martínez, A., Ascanio, G., Galindo, E. (1991) A new pneumatic bearing dynamometer for power input measurement in stirred tanks. *Chem. Eng. Technol.* (14):105-108.

- Rols, J. L., Goma, G. (1991) Enhanced oxygen transfer rates in fermentation using soybean oil-in-water dispersions. *Biotechnol. Letters*. 13(1): 7-12.
- Ruíz-Burguete, I. (2006) *Visualización estereoscópica de la dispersión de gotas de aceite y burbujas de aire en un sistema de fermentación tetrafásica*. Memoria de Residencia Profesional. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas-Instituto de Biotecnología UNAM.
- Schäfer, M., Wächter, P., Durst, F. (2000) Experimental investigation of local bubble size distributions in stirred vessels using phase doppler anemometry. In: 10th European Conference on Mixing, van den Akker, H. E. A. and Derksen, J.J. (eds), Elsevier, Delft, The Netherlands, pp 205–212.
- Schäfer, M., Yianneskis, M., Wätcher, P., Durst, F. (1998) Trailing vortices around a 45° pitched-blade impeller. *AIChE* 44(6):1233-1246.
- Serrano-Carreón, L., Flores C., Galindo E. (1997) γ -Decalactone production by *Trichoderma harzianum* in stirred bioreactors, *Biotechnol. Prog.*, 13: 205-208.
- Singh, K. K., Mahajani, S. M., Shenoy, K. T., Ghosh, S. K. (2008) Representative drop sizes and drop size distributions in A/O dispersions in continuous flow stirred tank, *Hydrometallurgy* 90: 121-136.
- Taboada, B., Córdova-Aguilar, M .S., Galindo, E., Corkidi G. (2002) Aplicación de la videoendoscopía de alta velocidad en la visualización de las interacciones complejas que se llevan a cabo en sistemas multifásicos. En Memorias del Congreso de Instrumentación SOMI XVII. Mérida, Yuc., México. Sociedad Mexicana de Instrumentación (SOMI). Octubre, 2002.
- Taboada, B., Córdova-Aguilar, M. S., Galindo, E., Corkidi, G. (2006) Aplicación de la videoendoscopía de alta velocidad en la visualización de las interacciones complejas que se llevan a cabo en sistemas multifásicos, Memorias XXI Congreso de Instrumentación SOMI, 22 al 25 de octubre 2006. Ensenada, Baja California, México, 2006.

- Taboada, B., Larralde, P., Brito-Albavera, T., Vega, L., Díaz, R., Galindo, E., Corkidi, G. (2003) Images acquisition of multiphase dispersion in fermentation processes, *J. Appl. Res. Technol.*, 1(1): 78-84.
- Takahashi, K., Nienow, A. (1993) Bubble sizes and coalescence rates in an aerated vessel agitated by a Rushton turbine. *J. Chem. Eng. Japan.* 26(5): 536-542.
- Tatterson, G. B. (1991) Gas dispersion in agitated tanks. In: Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks, Mc. Graw-Hill. U.S.A., pp. 417-529.
- Tayali, N. E., Bates, C. J. (1990) Particle sizing techniques in multiphase flows: A review. *Flow Meas. Instrum.* 1:77-105.
- Venneker, B. C. H., Derksen, J. J., Van den Akker, H. E. A. (2002) Population balance modelling of aerated stirred vessels based on CFD, *AIChE J.* 48: 673-685.
- Wong, C. W., Shiuan, J. H. (1986) Effect of the additives on mass transfer in an aerated mixing vessel. *Chem. Eng. Commun.* 43: 133-145.
- Zhou, G., Kresta, S. M. (1996) Distribution of energy between convective and turbulent flow for three frequently used impellers. *Trans IChemE, Part A, Chem Eng Res Des*, 74: 379-389.
- Zhou, G., Kresta, S. M. (1998a) Correlation of mean drop size and minimum drop size with the turbulence energy dissipation and the flow in an agitated tank. *Chem. Eng. Sci.* 53:2063-2079.
- Zhou, G., Kresta, S. M. (1998b) Evolution of drop size distribution in liquid – liquid dispersions for various impellers. *Chem. Eng. Sci.* 53 (11): 2099-2113.

ANEXO I Resultados de los análisis estadísticos

A continuación se presenta la hoja de resultados obtenida del análisis estadístico de Tukey-Kramer ($\alpha=0.05$). En cada una de las comparaciones se muestra una tabla en la que se asigna una letra para cada una de las muestras analizadas. Las muestras que son clasificadas con la misma letra no presentan diferencia significativamente diferente ($\alpha=0.05$).

Sistema bifásico Líquido-Gas

Se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de las muestras tomadas bajo las mismas condiciones para comprobar la reproducibilidad experimental.

ANOVA unidireccional: 2 Fases: A1, A2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	64	64	0.00	0.969
Error	618	26394809	42710		
Total	619	26394873			

S = 206.7 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

				ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada			
Nivel	N	Media	Desv.Est.	-----+-----+-----+-----+			
2F A1	310	167.9	206.5	(------*-----)			
2F A2	310	168.5	206.8	(------*-----)			
				-----+-----+-----+-----+			
				156	168	180	192

Desv.Est. agrupada = 206.7

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
2F A2	310	168.5	A
2F A1	310	167.9	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 2F A1 a:

	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+			
2F A2	-32.0	0.6	33.2	(------*-----)			
				-----+-----+-----+-----+			
				-20	0	20	40

ANOVA unidireccional: 2 Fases: B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	4	4	0.00	0.987
Error	618	9204055	14893		
Total	619	9204059			

S = 122.0 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
2F B1	310	124.9	121.6	(-----*-----)
2F B2	310	124.7	122.5	(-----*-----)

112.0 119.0 126.0 133.0

Desv.Est. agrupada = 122.0

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
2F B1	310	124.9	A
2F B2	310	124.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 2F B1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
2F B2	-19.4	-0.2	19.1	(-----*-----)

-10 0 10 20

ANOVA unidireccional: 2 Fases: D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	0	0	0.00	1.000
Error	618	12351673	19987		
Total	619	12351673			

S = 141.4 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
2F D1	310	164.3	141.5	(-----*-----)
2F D2	310	164.3	141.3	(-----*-----)

152.0 160.0 168.0 176.0

Desv.Est. agrupada = 141.4

Agrupar información utilizando el método de Tukey

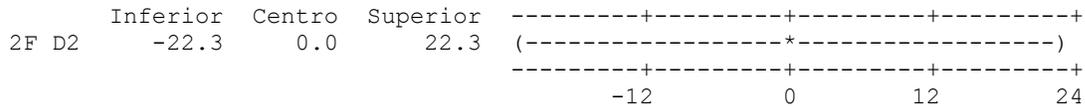
	N	Media	Agrupación
2F D2	310	164.3	A
2F D1	310	164.3	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

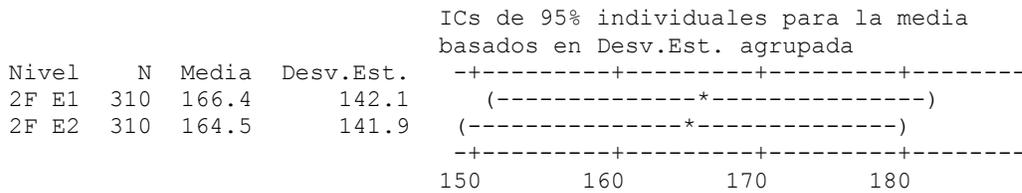
Se restó 2F D1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	558	558	0.03	0.868
Error	618	12455683	20155		
Total	619	12456241			

S = 142.0 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 142.0

Agrupar información utilizando el método de Tukey

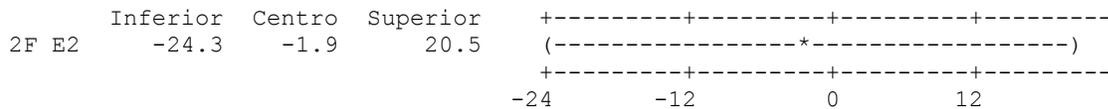
	N	Media	Agrupación
2F E1	310	166.4	A
2F E2	310	164.5	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 2F E1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	53293	53293	1.78	0.183
Error	618	18496069	29929		
Total	619	18549361			

S = 173.0 R-cuad. = 0.29% R-cuad.(ajustado) = 0.13%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
2F F1	310	177.5	164.4	(-----*-----)
2F F2	310	196.0	181.2	(-----*-----)

165 180 195 210

Desv.Est. agrupada = 173.0

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
2F F2	310	196.0	A
2F F1	310	177.5	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 2F F1 a:

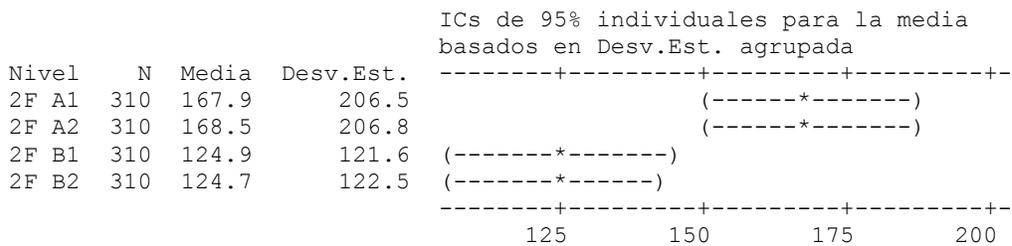
	Inferior	Centro	Superior	
2F F2	-8.7	18.5	45.8	(-----*-----)

Se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de las muestras tomadas en distintos puntos y bajo las mismas condiciones buscando diferencias significativas estadísticamente.

ANOVA unidireccional: 2 Fases A1, A2, B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	583576	194525	6.75	0.000
Error	1236	35598864	28802		
Total	1239	36182440			

S = 169.7 R-cuad. = 1.61% R-cuad.(ajustado) = 1.37%



Desv.Est. agrupada = 169.7

Agrupar información utilizando el método de Tukey

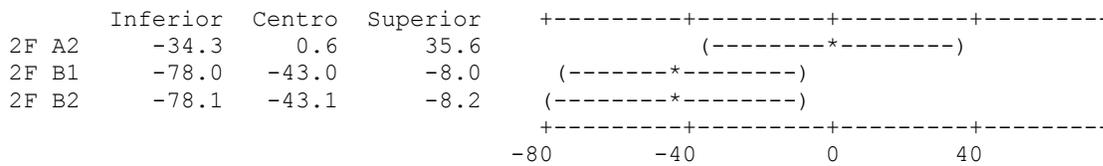
	N	Media	Agrupación
2F A2	310	168.5	A
2F A1	310	167.9	A
2F B1	310	124.9	B
2F B2	310	124.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

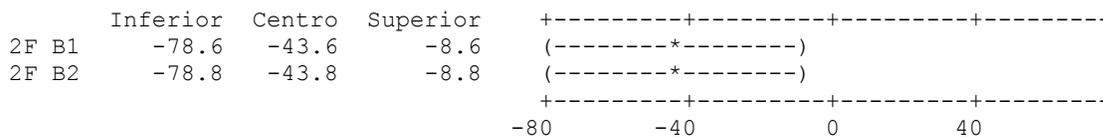
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

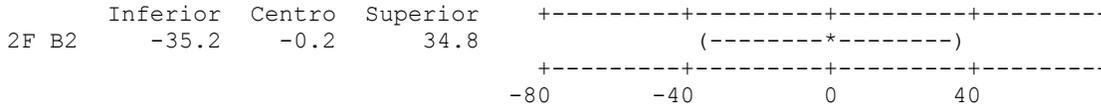
Se restó 2F A1 a:



Se restó 2F A2 a:



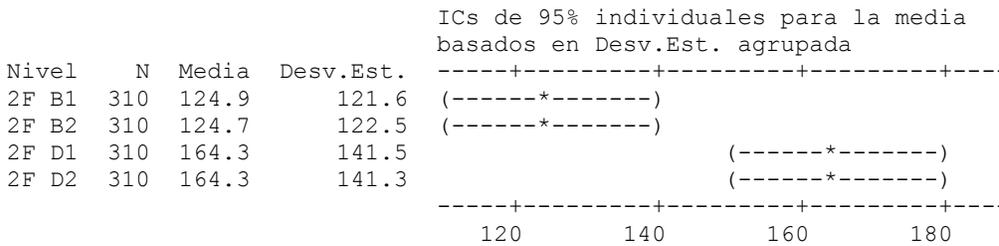
Se restó 2F B1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases B1, B2, D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	483065	161022	9.23	0.000
Error	1236	21555728	17440		
Total	1239	22038793			

S = 132.1 R-cuad. = 2.19% R-cuad.(ajustado) = 1.95%



Desv.Est. agrupada = 132.1

Agrupar información utilizando el método de Tukey

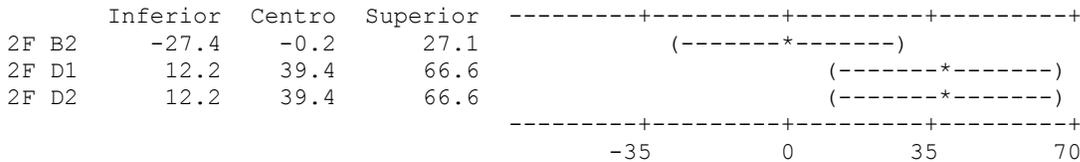
	N	Media	Agrupación
2F D2	310	164.3	A
2F D1	310	164.3	A
2F B1	310	124.9	B
2F B2	310	124.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

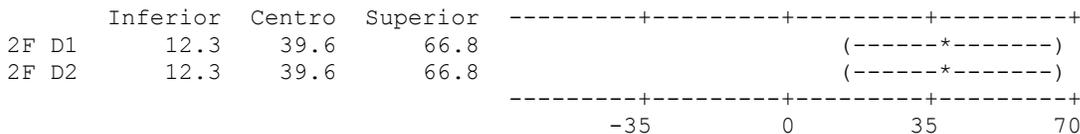
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

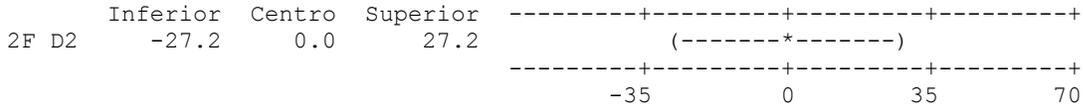
Se restó 2F B1 a:



Se restó 2F B2 a:



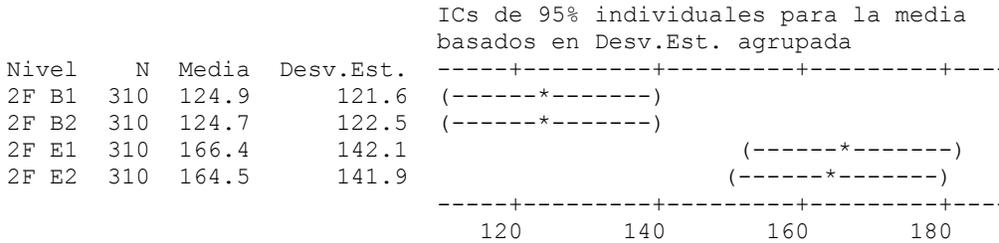
Se restó 2F D1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases B1, B2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	513353	171118	9.76	0.000
Error	1236	21659738	17524		
Total	1239	22173092			

S = 132.4 R-cuad. = 2.32% R-cuad.(ajustado) = 2.08%



Desv.Est. agrupada = 132.4

Agrupar información utilizando el método de Tukey

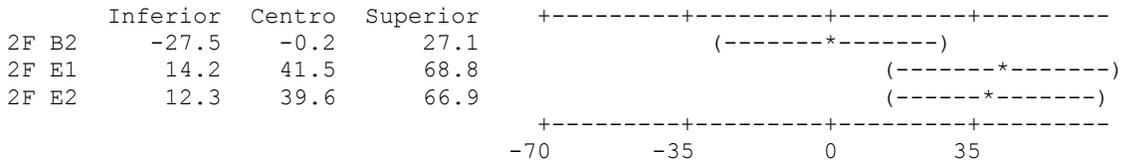
	N	Media	Agrupación
2F E1	310	166.4	A
2F E2	310	164.5	A
2F B1	310	124.9	B
2F B2	310	124.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

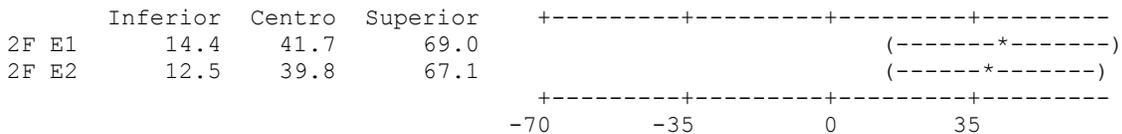
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

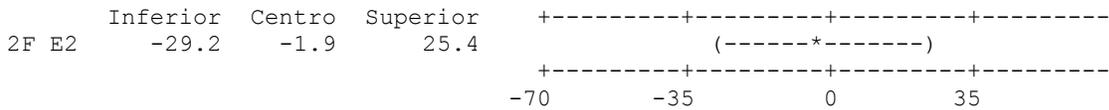
Se restó 2F B1 a:



Se restó 2F B2 a:



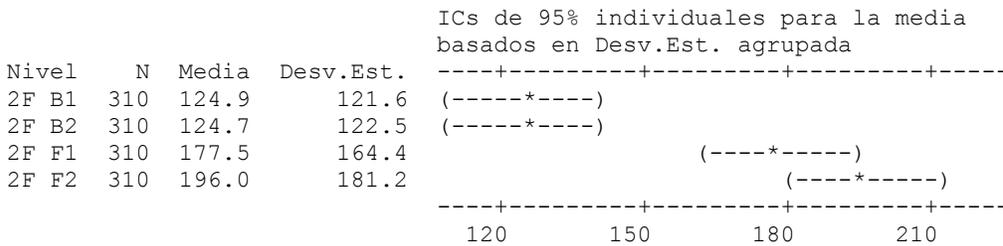
Se restó 2F E1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases B1, B2, F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	1241853	413951	18.47	0.000
Error	1236	27700124	22411		
Total	1239	28941976			

S = 149.7 R-cuad. = 4.29% R-cuad.(ajustado) = 4.06%



Desv.Est. agrupada = 149.7

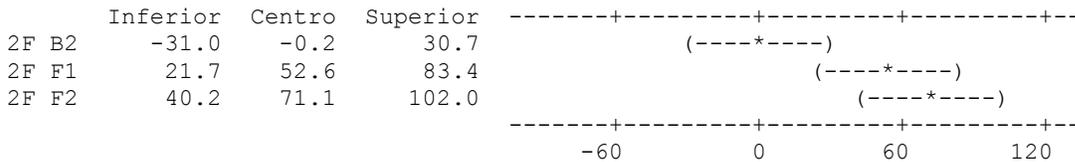
Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
2F F2	310	196.0	A
2F F1	310	177.5	A
2F B1	310	124.9	B
2F B2	310	124.7	B

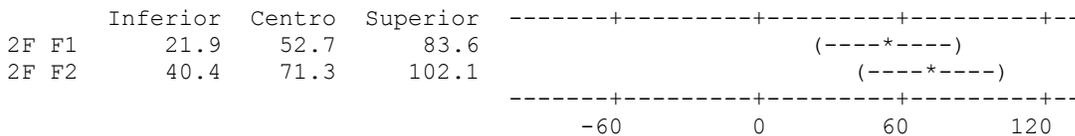
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

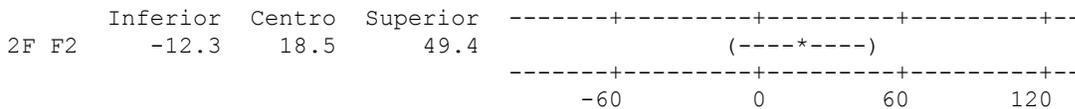
Se restó 2F B1 a:



Se restó 2F B2 a:



Se restó 2F F1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases A1, A2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	2905	968	0.03	0.993
Error	1236	38850493	31432		
Total	1239	38853397			

S = 177.3 R-cuad. = 0.01% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
2F A1	310	167.9	206.5	(-----*-----)
2F A2	310	168.5	206.8	(-----*-----)
2F E1	310	166.4	142.1	(-----*-----)
2F E2	310	164.5	141.9	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----+
156 168 180 192

Desv.Est. agrupada = 177.3

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
2F A2	310	168.5	A
2F A1	310	167.9	A
2F E1	310	166.4	A
2F E2	310	164.5	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

Se restó 2F A1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
2F A2	-35.9	0.6	37.2	(-----*-----)
2F E1	-38.0	-1.4	35.1	(-----*-----)
2F E2	-39.9	-3.3	33.2	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----+
-25 0 25 50

Se restó 2F A2 a:

	Inferior	Centro	Superior	
2F E1	-38.6	-2.1	34.5	(-----*-----)
2F E2	-40.5	-4.0	32.6	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----+
-25 0 25 50

Se restó 2F E1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
2F E2	-38.4	-1.9	34.7	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----+
-25 0 25 50

Sistema bifásico Líquido- Líquido

Se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de las muestras tomadas bajo las mismas condiciones para comprobar la reproducibilidad experimental.

ANOVA unidireccional: 2 fases: A1, A2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	64	64	0.00	0.969
Error	618	26394809	42710		
Total	619	26394873			

S = 206.7 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

				ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada			
Nivel	N	Media	Desv.Est.	-----+-----+-----+-----+			
A1	310	167.9	206.5	(-----*-----)			
A2	310	168.5	206.8	(-----*-----)			
				-----+-----+-----+-----+			
				156	168	180	192

Desv.Est. agrupada = 206.7
Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
A2	310	168.5	A
A1	310	167.9	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas
Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó A1 a:

	Inferior	Centro	Superior	-----+-----+-----+-----+			
A2	-32.0	0.6	33.2	(-----*-----)			
				-----+-----+-----+-----+			
				-20	0	20	40

ANOVA unidireccional: B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	4	4	0.00	0.987
Error	618	9204055	14893		
Total	619	9204059			

S = 122.0 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

				ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada			
Nivel	N	Media	Desv.Est.	+-----+-----+-----+-----+			
B1	310	124.9	121.6	(-----*-----)			
B2	310	124.7	122.5	(-----*-----)			
				+-----+-----+-----+-----+			
				112.0	119.0	126.0	133.0

Desv.Est. agrupada = 122.0

Agrupar información utilizando el método de Tukey

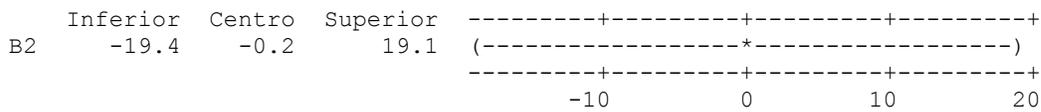
	N	Media	Agrupación
B1	310	124.9	A
B2	310	124.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

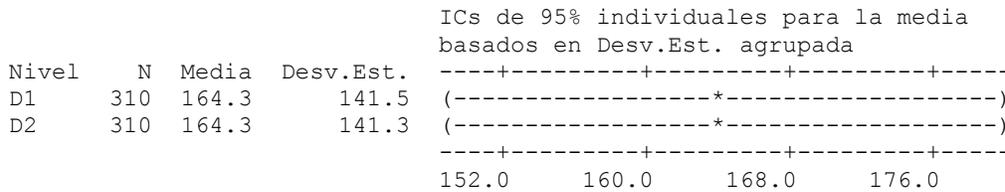
Se restó B1 a:



ANOVA unidireccional: 2 fases: D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	0	0	0.00	1.000
Error	618	12351673	19987		
Total	619	12351673			

S = 141.4 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 141.4

Agrupar información utilizando el método de Tukey

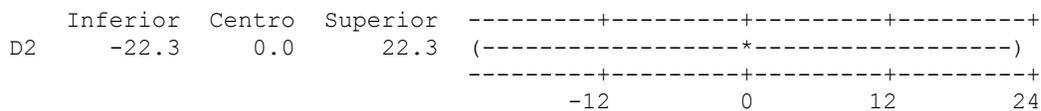
	N	Media	Agrupación
D2	310	164.3	A
D1	310	164.3	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó D1 a:



ANOVA unidireccional: 2 fases: E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	558	558	0.03	0.868
Error	618	12455683	20155		
Total	619	12456241			

S = 142.0 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.
E1	310	166.4	142.1
E2	310	164.5	141.9

Desv.Est. agrupada = 142.0

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
E1	310	166.4	A
E2	310	164.5	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó E1 a:

	Inferior	Centro	Superior
E2	-24.3	-1.9	20.5

ANOVA unidireccional: 2 fases: F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	53293	53293	1.78	0.183
Error	618	18496069	29929		
Total	619	18549361			

S = 173.0 R-cuad. = 0.29% R-cuad.(ajustado) = 0.13%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.
F1	310	177.5	164.4
F2	310	196.0	181.2

Desv.Est. agrupada = 173.0

Agrupar información utilizando el método de Tukey

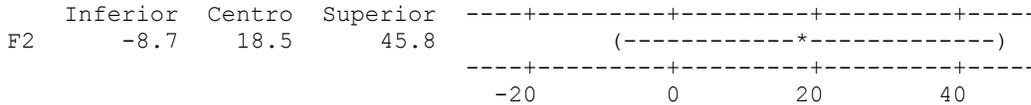
	N	Media	Agrupación
F2	310	196.0	A
F1	310	177.5	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó F1 a:

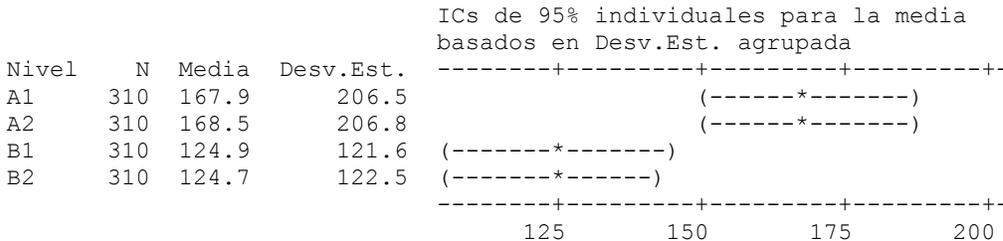


Se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de las muestras tomadas en distintos puntos y bajo las mismas condiciones buscando diferencias significativas estadísticamente.

ANOVA unidireccional: 2 Fases: A1, A2, B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	583576	194525	6.75	0.000
Error	1236	35598864	28802		
Total	1239	36182440			

S = 169.7 R-cuad. = 1.61% R-cuad. (ajustado) = 1.37%



Desv.Est. agrupada = 169.7

Agrupar información utilizando el método de Tukey

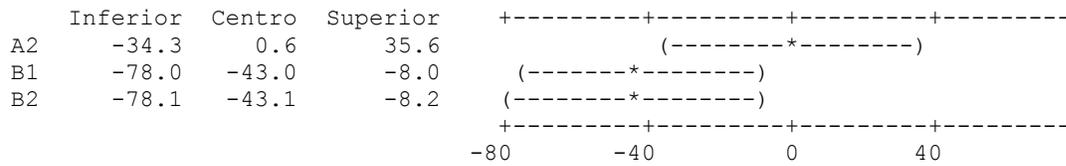
	N	Media	Agrupación
A2	310	168.5	A
A1	310	167.9	A
B1	310	124.9	B
B2	310	124.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

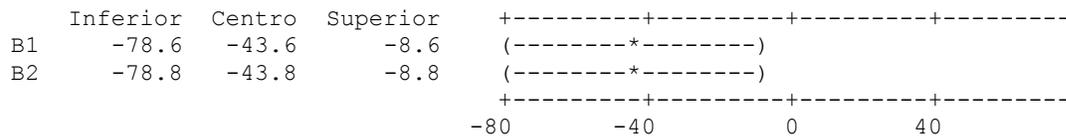
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

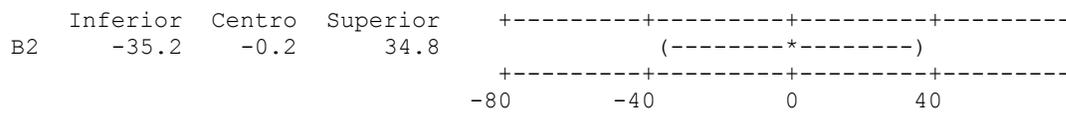
Se restó A1 a:



Se restó A2 a:



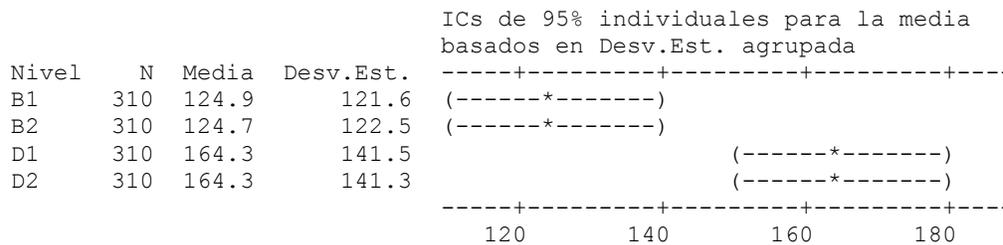
Se restó B1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: B1, B2, D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	483065	161022	9.23	0.000
Error	1236	21555728	17440		
Total	1239	22038793			

S = 132.1 R-cuad. = 2.19% R-cuad.(ajustado) = 1.95%



Desv.Est. agrupada = 132.1

Agrupar información utilizando el método de Tukey

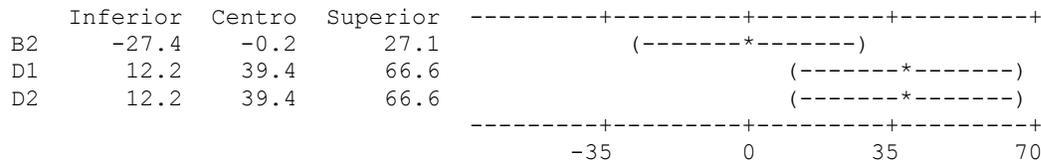
	N	Media	Agrupación
D2	310	164.3	A
D1	310	164.3	A
B1	310	124.9	B
B2	310	124.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

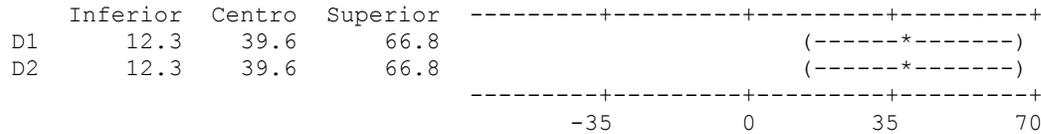
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

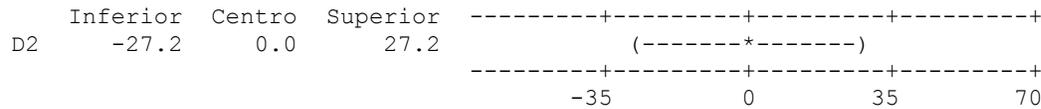
Se restó B1 a:



Se restó B2 a:



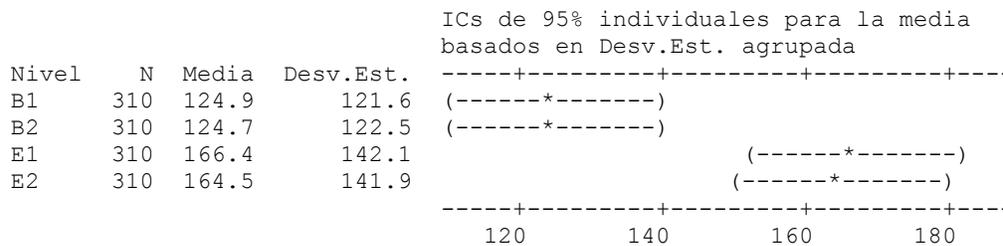
Se restó D1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: B1, B2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	513353	171118	9.76	0.000
Error	1236	21659738	17524		
Total	1239	22173092			

S = 132.4 R-cuad. = 2.32% R-cuad.(ajustado) = 2.08%



Desv.Est. agrupada = 132.4

Agrupar información utilizando el método de Tukey

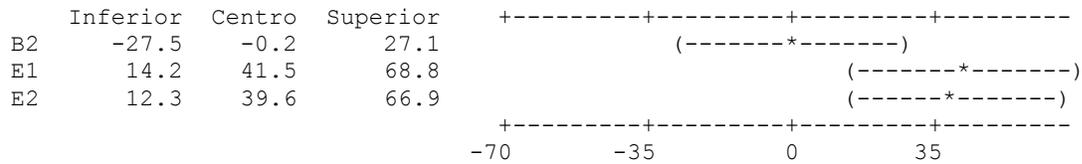
	N	Media	Agrupación
E1	310	166.4	A
E2	310	164.5	A
B1	310	124.9	B
B2	310	124.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

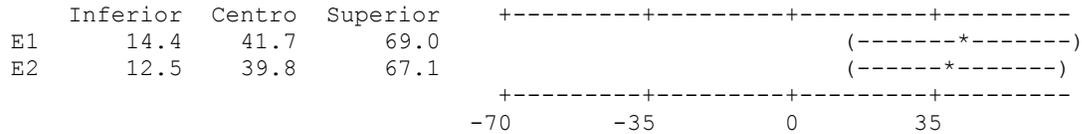
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

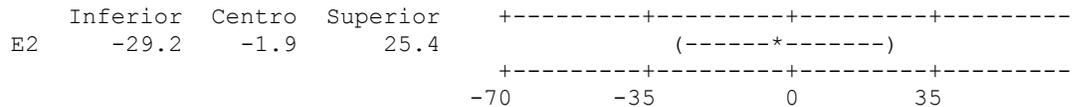
Se restó B1 a:



Se restó B2 a:



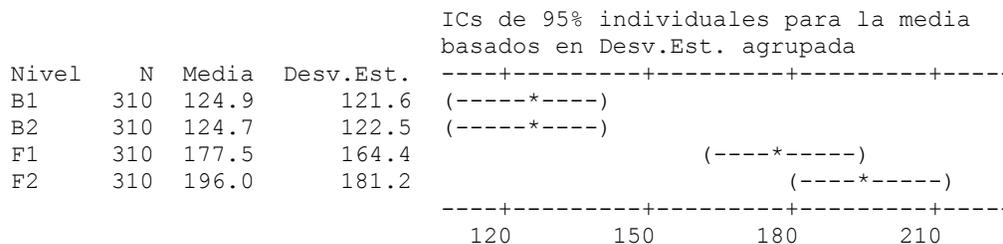
Se restó E1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: B1, B2, F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	1241853	413951	18.47	0.000
Error	1236	27700124	22411		
Total	1239	28941976			

S = 149.7 R-cuad. = 4.29% R-cuad.(ajustado) = 4.06%



Desv.Est. agrupada = 149.7

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
F2	310	196.0	A
F1	310	177.5	A
B1	310	124.9	B
B2	310	124.7	B

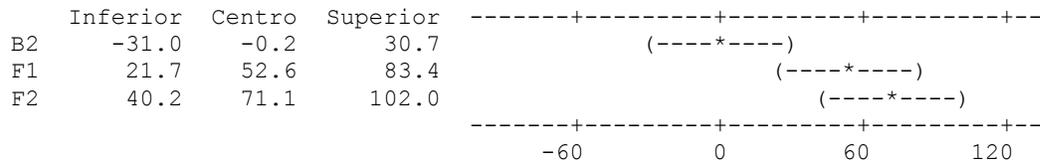
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

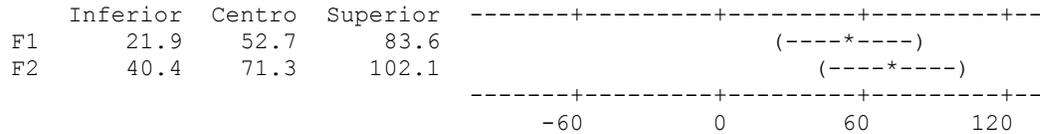
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

Se restó B1 a:



Se restó B2 a:



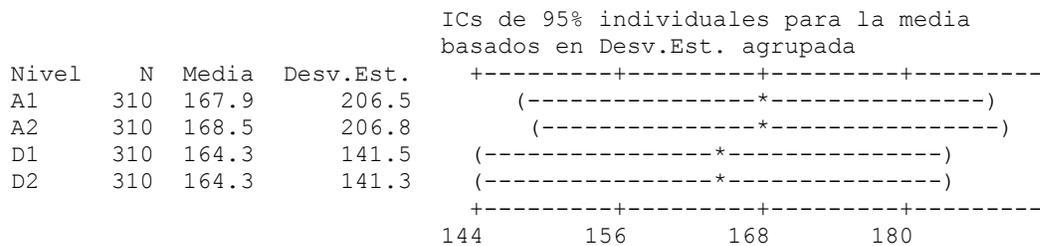
Se restó F1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: A1, A2, D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	4804	1601	0.05	0.985
Error	1236	38746482	31348		
Total	1239	38751286			

S = 177.1 R-cuad. = 0.01% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 177.1

Agrupar información utilizando el método de Tukey

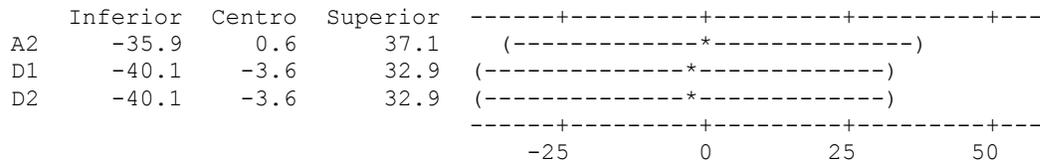
	N	Media	Agrupación
A2	310	168.5	A
A1	310	167.9	A
D2	310	164.3	A
D1	310	164.3	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

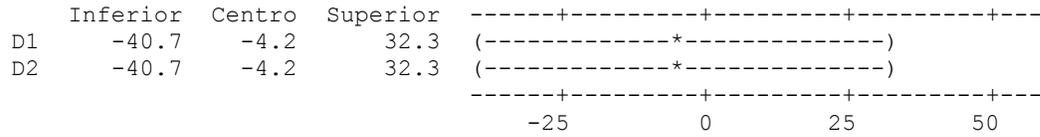
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

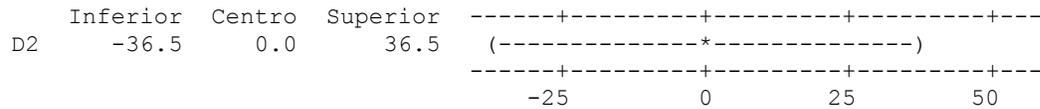
Se restó A1 a:



Se restó A2 a:



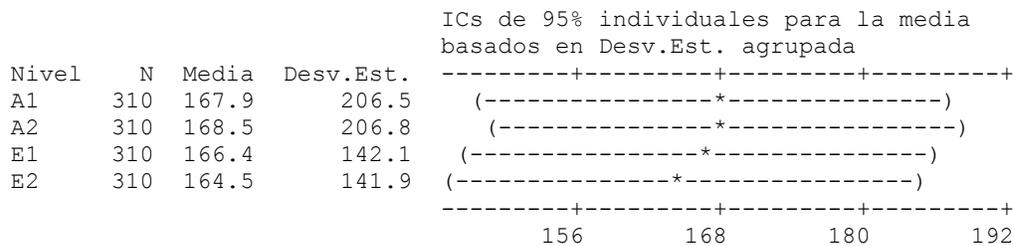
Se restó D1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: A1, A2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	2905	968	0.03	0.993
Error	1236	38850493	31432		
Total	1239	38853397			

S = 177.3 R-cuad. = 0.01% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 177.3

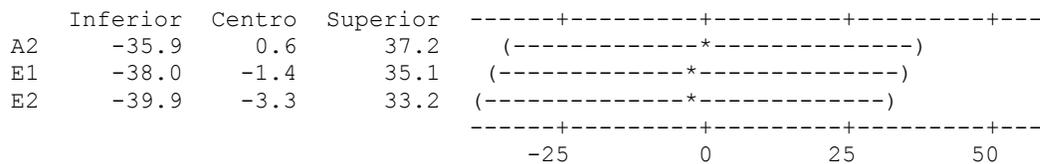
Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
A2	310	168.5	A
A1	310	167.9	A
E1	310	166.4	A
E2	310	164.5	A

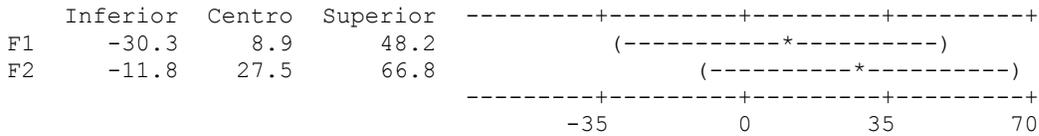
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

Todas las comparaciones en parejas
Nivel de confianza individual = 98.96%

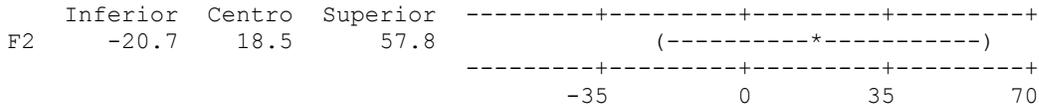
Se restó A1 a:



Se restó A2 a:



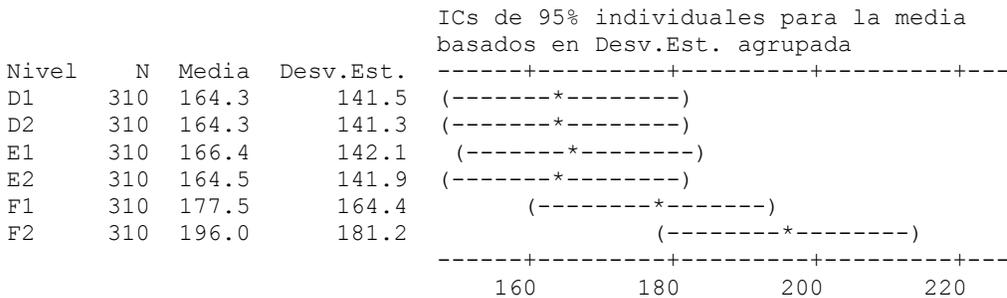
Se restó F1 a:



ANOVA unidireccional: 2 Fases: D1, D2, E1, E2, F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	5	251567	50313	2.15	0.057
Error	1854	43303425	23357		
Total	1859	43554992			

S = 152.8 R-cuad. = 0.58% R-cuad.(ajustado) = 0.31%



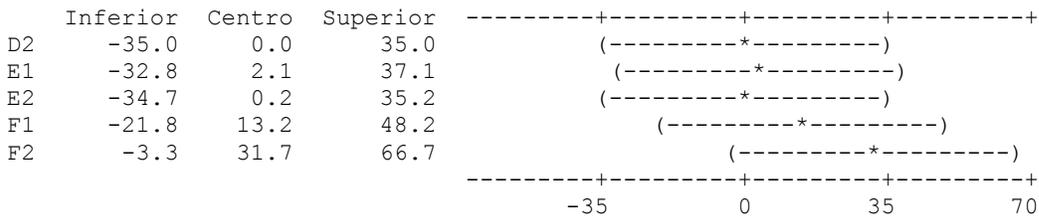
Desv.Est. agrupada = 152.8
Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
F2	310	196.0	A
F1	310	177.5	A
E1	310	166.4	A
E2	310	164.5	A
D2	310	164.3	A
D1	310	164.3	A

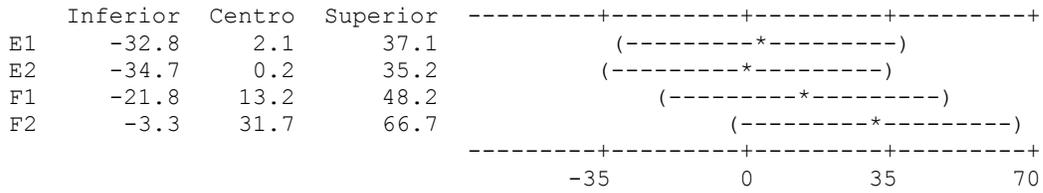
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 99.56%

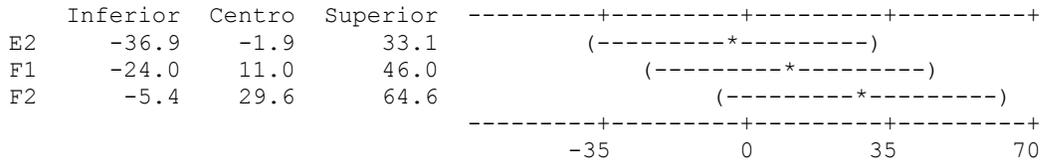
Se restó D1 a:



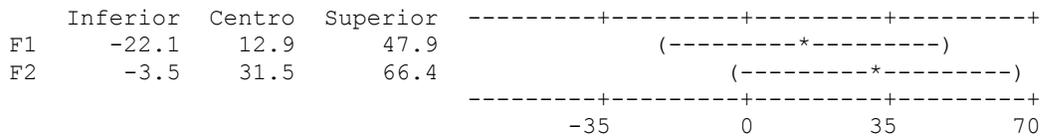
Se restó D2 a:



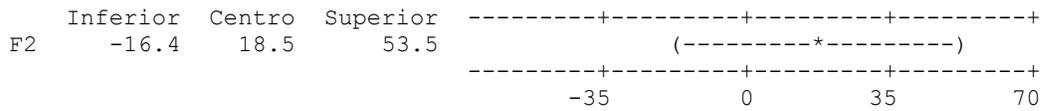
Se restó E1 a:



Se restó E2 a:



Se restó F1 a:



Sistema trifásico Líquido-Líquido-Gas (Burbujas)

Se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico de las muestras tomadas bajo las mismas condiciones para comprobar la reproducibilidad experimental.

ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	145	145	0.01	0.935
Error	618	13348478	21599		
Total	619	13348623			

S = 147.0 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
3F A1	310	180.7	143.7	(-----*-----)
3F A2	310	179.7	150.2	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
170 180 190 200

Desv.Est. agrupada = 147.0
Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F A1	310	180.7	A
3F A2	310	179.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas
Nivel de confianza individual = 95.00%
Se restó 3F A1 a:

	Inferior	Centro	Superior	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
3F A2	-24.1	-1.0	22.2	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
-24 -12 0 12

ANOVA unidireccional: 3 Fases B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	7238	7238	0.89	0.347
Error	598	4883412	8166		
Total	599	4890650			

S = 90.37 R-cuad. = 0.15% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
3F B1	300	138.75	90.83	(-----*-----)
3F B2	300	131.80	89.91	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
126.0 133.0 140.0 147.0

Desv.Est. agrupada = 90.37

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F B1	300	138.75	A
3F B2	300	131.80	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 3F B1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F B2	-21.44	-6.95	7.54	+-----+-----+-----+-----+ (-----*-----) -+-----+-----+-----+-----+
				-20 -10 0 10

ANOVA unidireccional: 3 Fases D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	33	33	0.00	0.977
Error	618	23884495	38648		
Total	619	23884528			

S = 196.6 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media
basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
3F D1	310	202.0	197.1	+-----+-----+-----+-----+ (-----*-----)
3F D2	310	202.5	196.1	(-----*-----) +-----+-----+-----+-----+
				180 192 204 216

Desv.Est. agrupada = 196.6

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F D2	310	202.5	A
3F D1	310	202.0	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 3F D1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F D2	-30.6	0.5	31.5	-----+-----+-----+-----+ (-----*-----) -----+-----+-----+-----+
				-16 0 16 32

ANOVA unidireccional: 3 Fases E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	846	846	0.03	0.864
Error	600	17397469	28996		
Total	601	17398315			

S = 170.3 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.
3F E1	301	171.6	172.5
3F E2	301	174.0	168.0

-----+-----+-----+-----+-----
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----
 156 168 180 192

Desv.Est. agrupada = 170.3

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F E2	301	174.0	A
3F E1	301	171.6	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 3F E1 a:

	Inferior	Centro	Superior
3F E2	-24.9	2.4	29.6

-----+-----+-----+-----+-----+-----
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----+-----
 -15 0 15 30

ANOVA unidireccional: 3 Fases F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	70402	70402	0.78	0.377
Error	618	55688578	90111		
Total	619	55758980			

S = 300.2 R-cuad. = 0.13% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.
3F F1	310	300.4	290.0
3F F2	310	321.7	310.1

-----+-----+-----+-----+-----
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----
 275 300 325 350

Desv.Est. agrupada = 300.2

Agrupar información utilizando el método de Tukey

N	Media	Agrupación

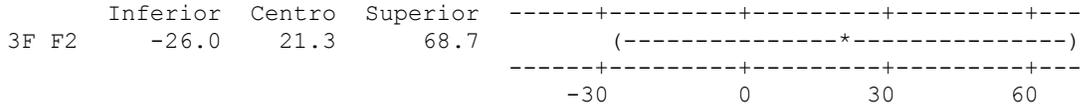
3F F2 310 321.7 A
 3F F1 310 300.4 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 3F F1 a:

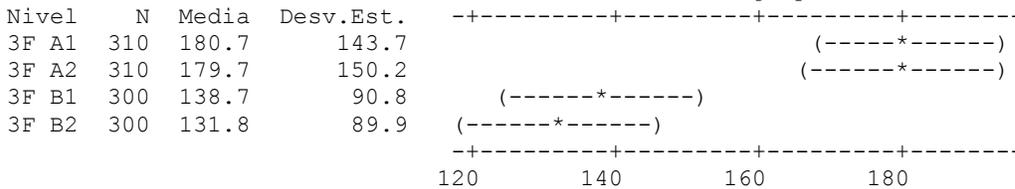


ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2, B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	622137	207379	13.83	0.000
Error	1216	18231890	14993		
Total	1219	18854027			

S = 122.4 R-cuad. = 3.30% R-cuad.(ajustado) = 3.06%

ICs de 95% individuales para la media
 basados en Desv.Est. agrupada



Desv.Est. agrupada = 122.4

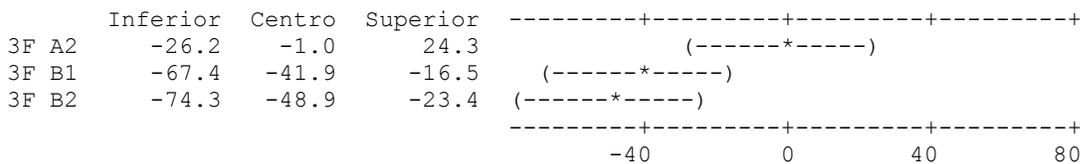
Agrupar información utilizando el método de Tukey

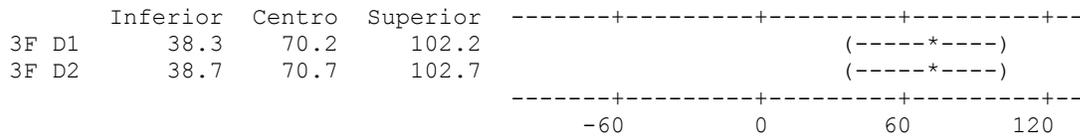
	N	Media	Agrupación
3F A1	310	180.7	A
3F A2	310	179.7	A
3F B1	300	138.7	B
3F B2	300	131.8	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

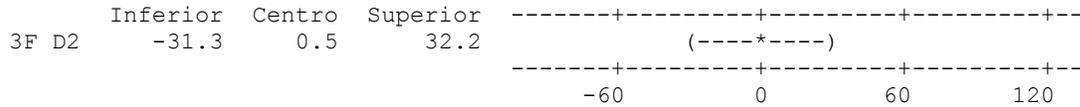
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas
 Nivel de confianza individual = 98.96%

Se restó 3F A1 a:





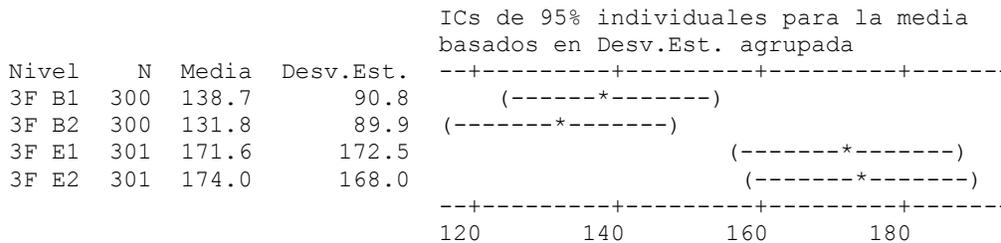
Se restó 3F D1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases B1, B2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	431598	143866	7.74	0.000
Error	1198	22280882	18598		
Total	1201	22712479			

S = 136.4 R-cuad. = 1.90% R-cuad.(ajustado) = 1.65%



Desv.Est. agrupada = 136.4

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F E2	301	174.0	A
3F E1	301	171.6	A
3F B1	300	138.7	B
3F B2	300	131.8	B

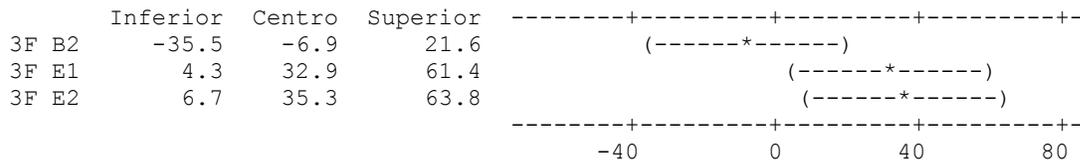
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%

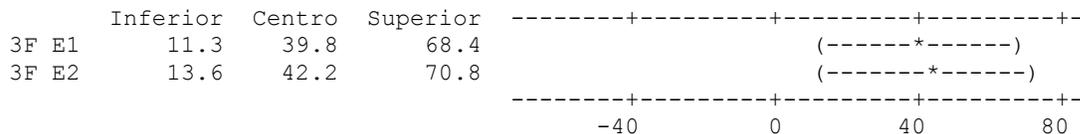
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

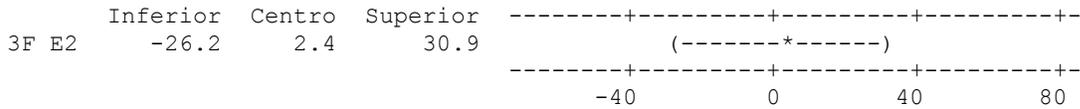
Se restó 3F B1 a:



Se restó 3F B2 a:



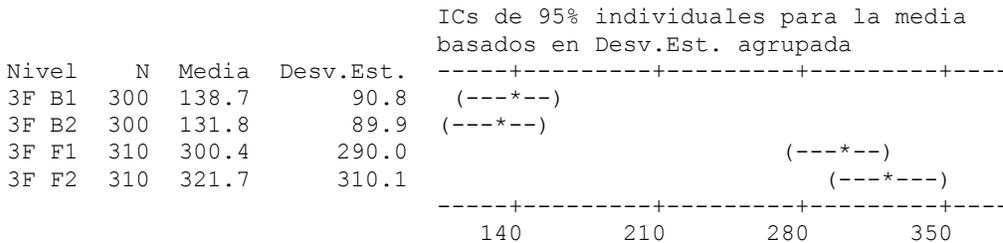
Se restó 3F E1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases B1, B2, F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	9494097	3164699	63.53	0.000
Error	1216	60571990	49812		
Total	1219	70066087			

S = 223.2 R-cuad. = 13.55% R-cuad.(ajustado) = 13.34%



Desv.Est. agrupada = 223.2

Agrupar información utilizando el método de Tukey

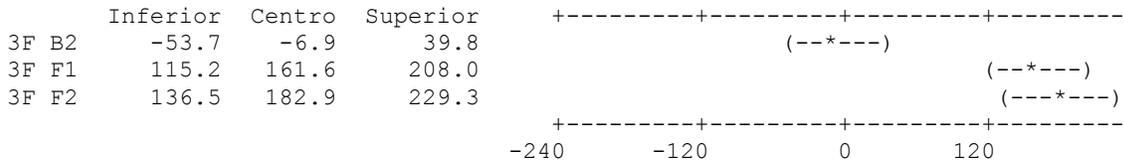
	N	Media	Agrupación
3F F2	310	321.7	A
3F F1	310	300.4	A
3F B1	300	138.7	B
3F B2	300	131.8	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

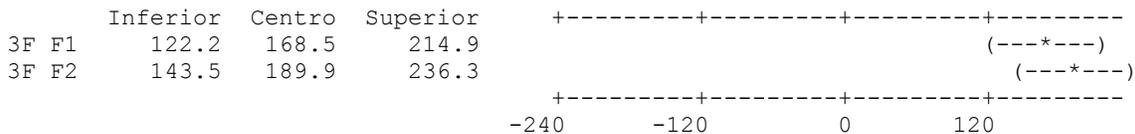
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

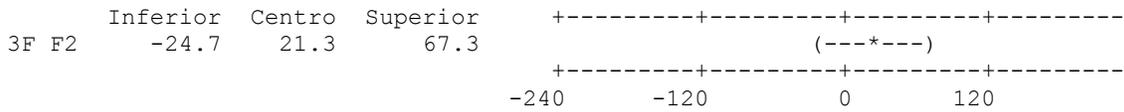
Se restó 3F B1 a:



Se restó 3F B2 a:



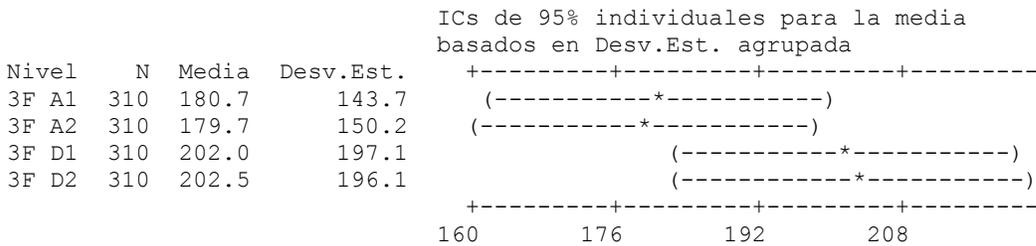
Se restó 3F F1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2, D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	151473	50491	1.68	0.170
Error	1236	37232973	30124		
Total	1239	37384445			

S = 173.6 R-cuad. = 0.41% R-cuad.(ajustado) = 0.16%



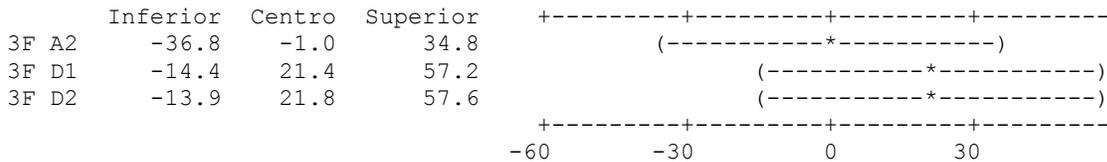
Desv.Est. agrupada = 173.6

Agrupar información utilizando el método de Tukey

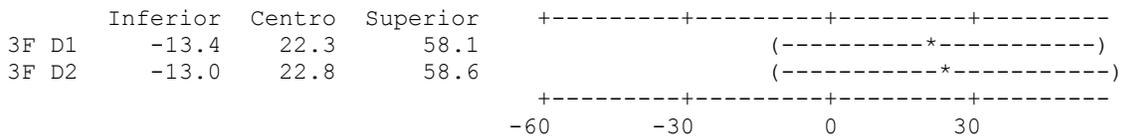
	N	Media	Agrupación
3F D2	310	202.5	A
3F D1	310	202.0	A
3F A1	310	180.7	A
3F A2	310	179.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas
Nivel de confianza individual = 98.96%

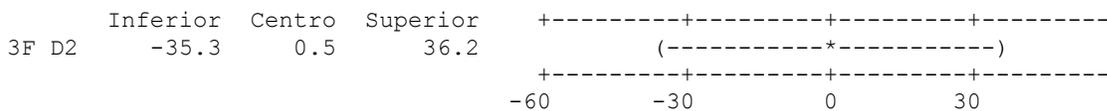
Se restó 3F A1 a:



Se restó 3F A2 a:



Se restó 3F D1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	17535	5845	0.23	0.874
Error	1218	30745947	25243		
Total	1221	30763482			

S = 158.9 R-cuad. = 0.06% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
3F A1	310	180.7	143.7	(-----*-----)
3F A2	310	179.7	150.2	(-----*-----)
3F E1	301	171.6	172.5	(-----*-----)
3F E2	301	174.0	168.0	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
 156 168 180 192

Desv.Est. agrupada = 158.9

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F A1	310	180.7	A
3F A2	310	179.7	A
3F E2	301	174.0	A
3F E1	301	171.6	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

Se restó 3F A1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F A2	-33.7	-1.0	31.8	(-----*-----)
3F E1	-42.0	-9.0	24.0	(-----*-----)
3F E2	-39.7	-6.7	26.3	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
 -25 0 25 50

Se restó 3F A2 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F E1	-41.1	-8.1	24.9	(-----*-----)
3F E2	-38.7	-5.7	27.3	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
 -25 0 25 50

Se restó 3F E1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F E2	-30.9	2.4	35.6	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----+-----
 -25 0 25 50

ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2, F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	5376757	1792252	32.09	0.000
Error	1236	69037056	55855		
Total	1239	74413812			

S = 236.3 R-cuad. = 7.23% R-cuad.(ajustado) = 7.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
3F A1	310	180.7	143.7	(----*----)
3F A2	310	179.7	150.2	(----*----)
3F F1	310	300.4	290.0	(----*----)
3F F2	310	321.7	310.1	(----*----)

-----+-----+-----+-----+
 200 250 300 350

Desv.Est. agrupada = 236.3

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F F2	310	321.7	A
3F F1	310	300.4	A
3F A1	310	180.7	B
3F A2	310	179.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.96%

Se restó 3F A1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F A2	-49.7	-1.0	47.8	(----*----)
3F F1	71.0	119.7	168.4	(----*----)
3F F2	92.3	141.0	189.7	(----*----)

-----+-----+-----+-----+
 -100 0 100 200

Se restó 3F A2 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F F1	71.9	120.7	169.4	(----*----)
3F F2	93.2	142.0	190.7	(----*----)

-----+-----+-----+-----+
 -100 0 100 200

Se restó 3F F1 a:

	Inferior	Centro	Superior	
3F F2	-27.4	21.3	70.0	(----*----)

-----+-----+-----+-----+
 -100 0 100 200

Sistema trifásico Líquido-Líquido-Gas (Gotas)

ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	4308	4308	0.11	0.745
Error	1018	41420014	40688		
Total	1019	41424322			

S = 201.7 R-cuad. = 0.01% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs
3F A1	510	207.7	206.9	(-----*-----)
3F A2	510	203.6	196.4	(-----*-----)

190 200 210 220

Desv.Est. agrupada = 201.7

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F A1	510	207.7	A
3F A2	510	203.6	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 3F A1 a:

	Inferior	Centro	Superior	ICs
3F A2	-28.9	-4.1	20.7	(-----*-----)

-15 0 15 30

ANOVA unidireccional: 3 Fases B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	7	7	0.00	0.988
Error	1028	32337885	31457		
Total	1029	32337892			

S = 177.4 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs
3F B1	515	159.7	179.1	(-----*-----)
3F B2	515	159.9	175.6	(-----*-----)

144.0 152.0 160.0 168.0

Desv.Est. agrupada = 177.4

Agrupar información utilizando el método de Tukey

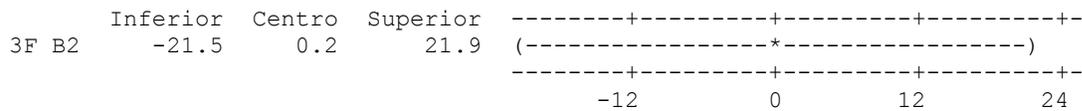
	N	Media	Agrupación
3F B2	515	159.9	A
3F B1	515	159.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

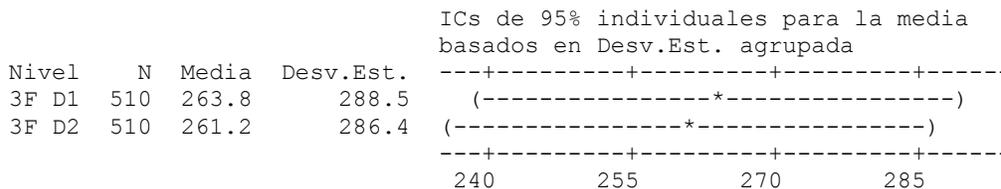
Se restó 3F B1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	1768	1768	0.02	0.884
Error	1018	84110332	82623		
Total	1019	84112101			

S = 287.4 R-cuad. = 0.00% R-cuad.(ajustado) = 0.00%



Desv.Est. agrupada = 287.4

Agrupar información utilizando el método de Tukey

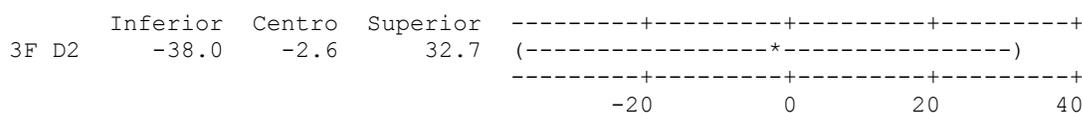
	N	Media	Agrupación
3F D1	510	263.8	A
3F D2	510	261.2	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 3F D1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	4426	4426	0.07	0.792
Error	1028	65366518	63586		
Total	1029	65370944			

S = 252.2 R-cuad. = 0.01% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
3F E1	515	214.9	245.8	(-----*-----)
3F E2	515	210.7	258.4	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				192 204 216 228

Desv.Est. agrupada = 252.2

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F E1	515	214.9	A
3F E2	515	210.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

Se restó 3F E1 a:

	Inferior	Centro	Superior	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
3F E2	-35.0	-4.1	26.7	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-20 0 20 40

ANOVA unidireccional: 3 Fases F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	640423	640423	8.12	0.004
Error	1018	80333820	78913		
Total	1019	80974243			

S = 280.9 R-cuad. = 0.79% R-cuad.(ajustado) = 0.69%

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
3F F1	510	268.7	271.5	(-----*-----)
3F F2	510	318.8	290.0	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				250 275 300 325

Desv.Est. agrupada = 280.9

Agrupar información utilizando el método de Tukey

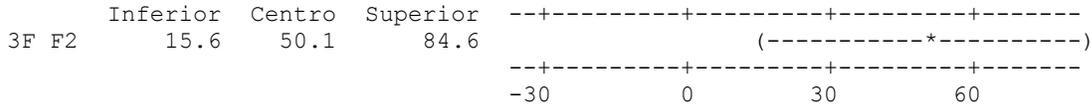
	N	Media	Agrupación
3F F2	510	318.8	A
3F F1	510	268.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 95.00%

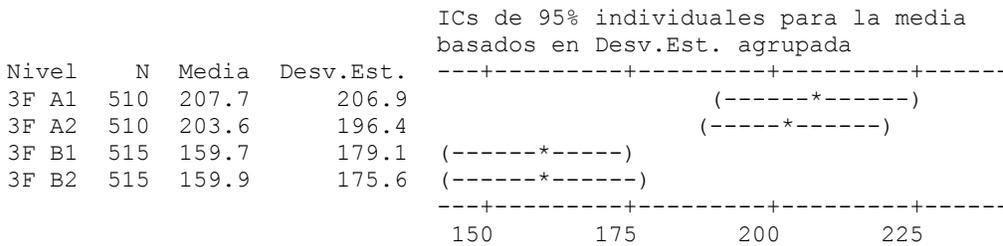
Se restó 3F F1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2, B1, B2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	1083363	361121	10.02	0.000
Error	2046	73757898	36050		
Total	2049	74841262			

S = 189.9 R-cuad. = 1.45% R-cuad.(ajustado) = 1.30%



Desv.Est. agrupada = 189.9
 Agrupar información utilizando el método de Tukey

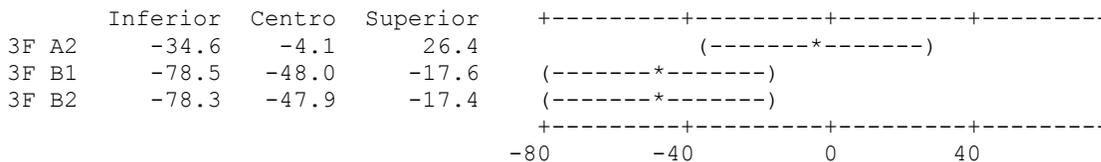
	N	Media	Agrupación
3F A1	510	207.7	A
3F A2	510	203.6	A
3F B2	515	159.9	B
3F B1	515	159.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

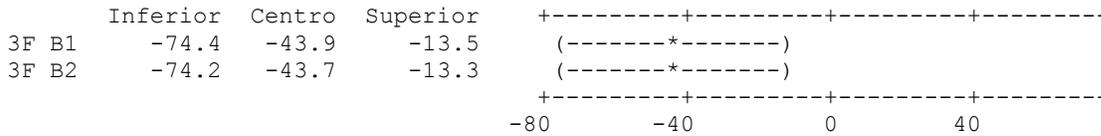
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
 Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.97%

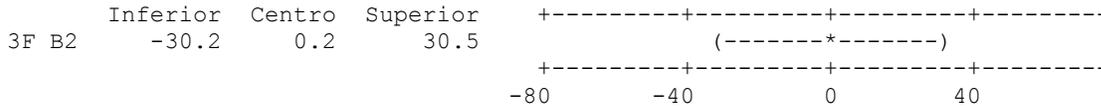
Se restó 3F A1 a:



Se restó 3F A2 a:



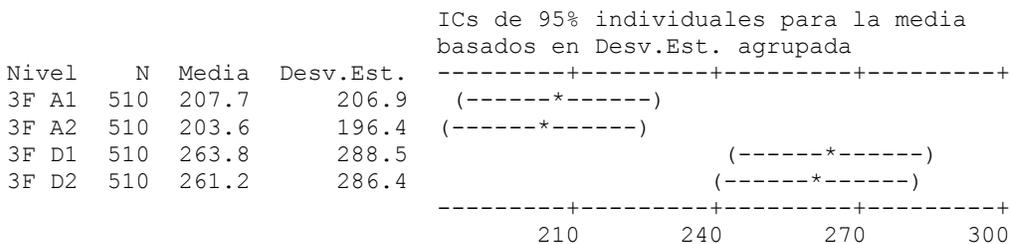
Se restó 3F B1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases A1, A2, D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	1652527	550842	8.93	0.000
Error	2036	125530346	61655		
Total	2039	127182873			

S = 248.3 R-cuad. = 1.30% R-cuad.(ajustado) = 1.15%



Desv.Est. agrupada = 248.3

Agrupar información utilizando el método de Tukey

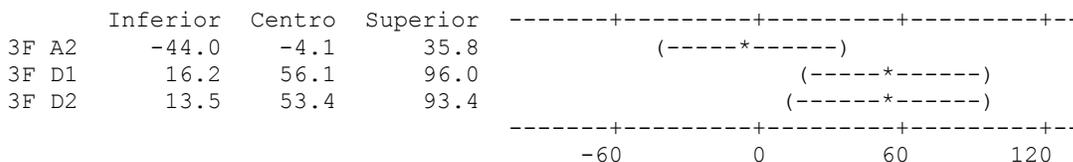
	N	Media	Agrupación
3F D1	510	263.8	A
3F D2	510	261.2	A
3F A1	510	207.7	B
3F A2	510	203.6	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

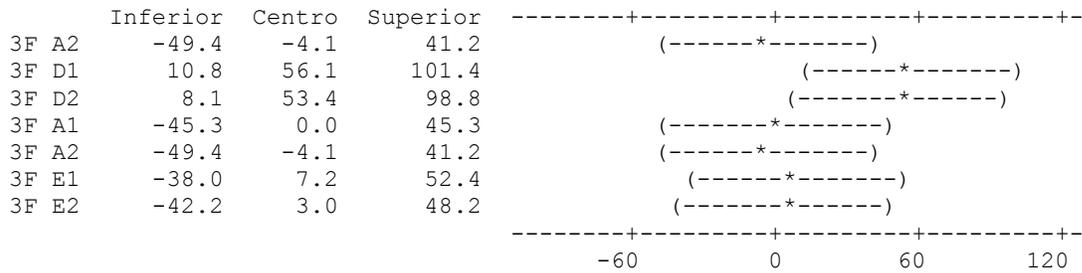
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.97%

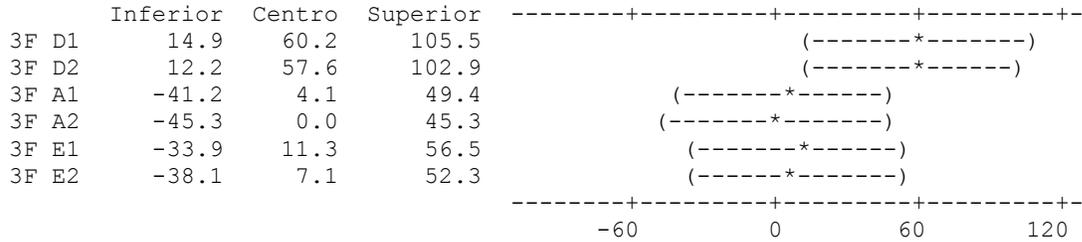
Se restó 3F A1 a:



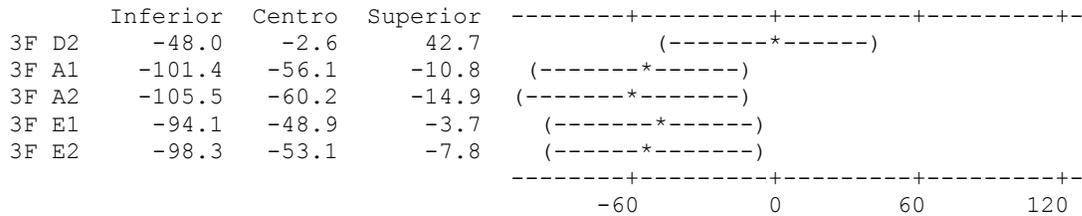
Se restó 3F A2 a:



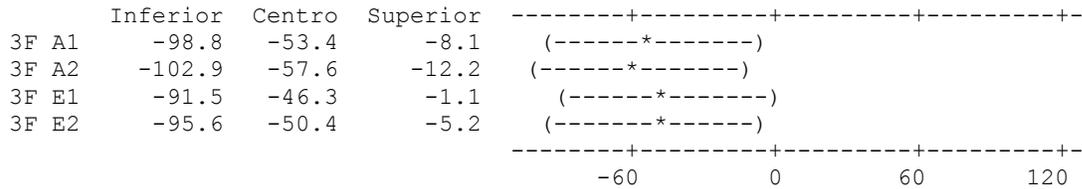
Se restó 3F A2 a:



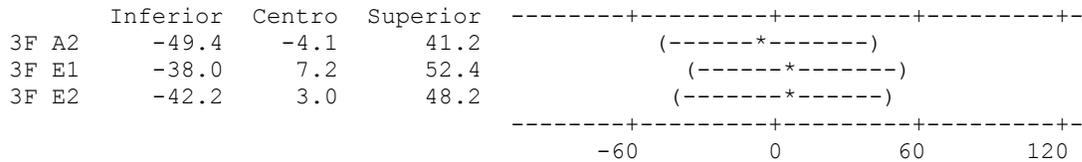
Se restó 3F D1 a:



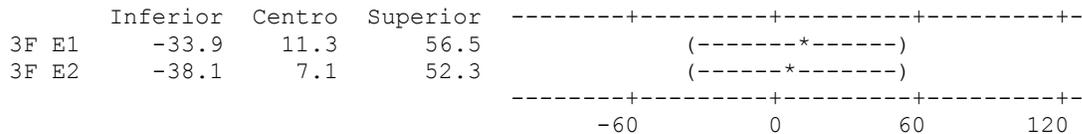
Se restó 3F D2 a:



Se restó 3F A1 a:



Se restó 3F A2 a:



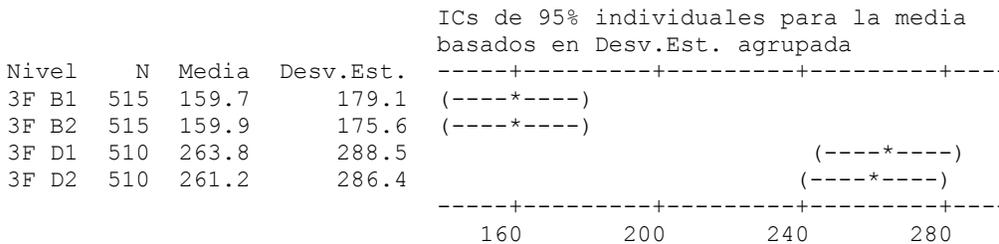
Se restó 3F E1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases B1, B2, D1, D2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	5407581	1802527	31.67	0.000
Error	2046	116448217	56915		
Total	2049	121855798			

S = 238.6 R-cuad. = 4.44% R-cuad.(ajustado) = 4.30%



Desv.Est. agrupada = 238.6

Agrupar información utilizando el método de Tukey

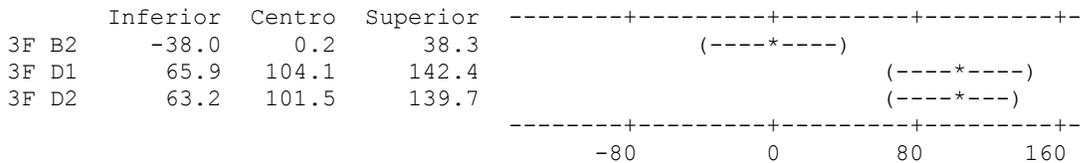
	N	Media	Agrupación
3F D1	510	263.8	A
3F D2	510	261.2	A
3F B2	515	159.9	B
3F B1	515	159.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

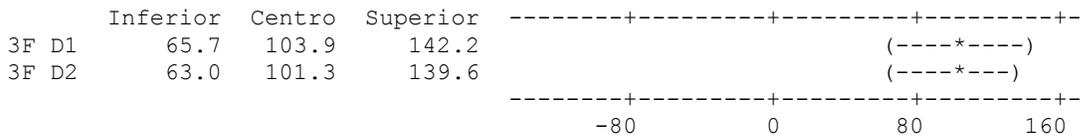
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.97%

Se restó 3F B1 a:



Se restó 3F B2 a:



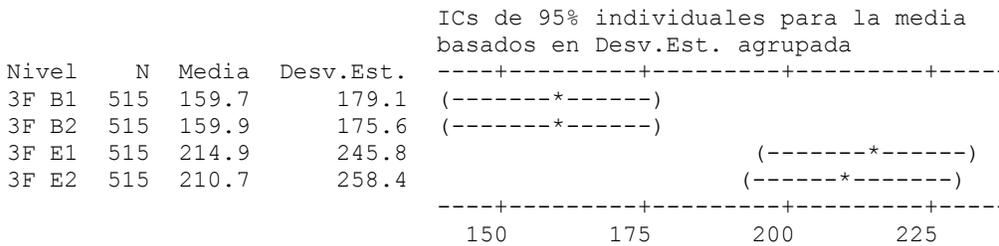
Se restó 3F D1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases B1, B2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	1453262	484421	10.19	0.000
Error	2056	97704403	47522		
Total	2059	99157665			

S = 218.0 R-cuad. = 1.47% R-cuad.(ajustado) = 1.32%



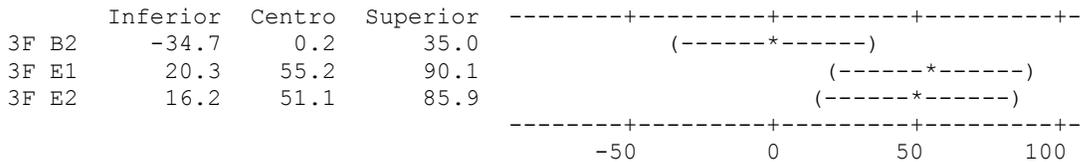
Desv.Est. agrupada = 218.0
Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F E1	515	214.9	A
3F E2	515	210.7	A
3F B2	515	159.9	B
3F B1	515	159.7	B

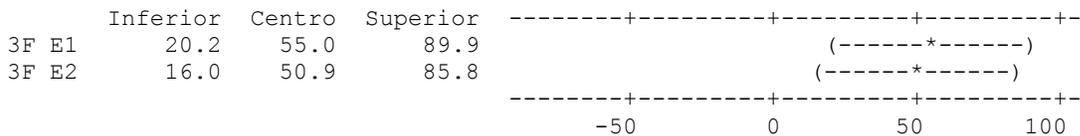
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.97%

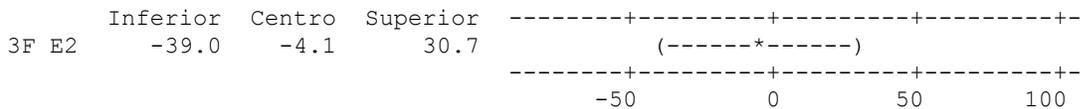
Se restó 3F B1 a:



Se restó 3F B2 a:



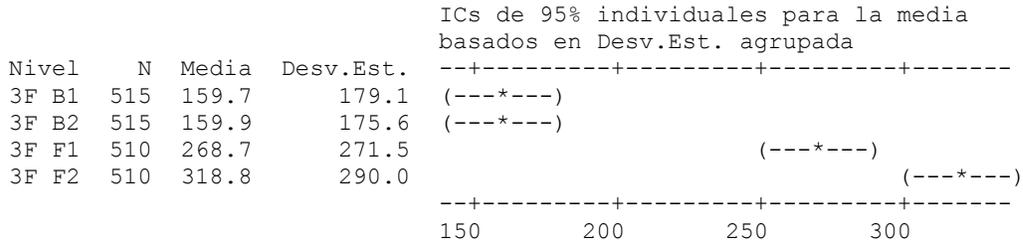
Se restó 3F E1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases B1, B2, F1, F2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	9834046	3278015	59.53	0.000
Error	2046	112671705	55069		
Total	2049	122505751			

S = 234.7 R-cuad. = 8.03% R-cuad.(ajustado) = 7.89%



Desv.Est. agrupada = 234.7

Agrupar información utilizando el método de Tukey

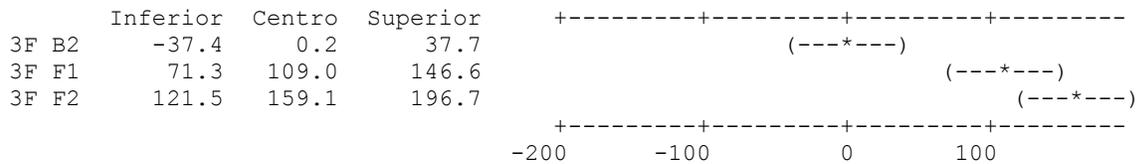
	N	Media	Agrupación
3F F2	510	318.8	A
3F F1	510	268.7	B
3F B2	515	159.9	C
3F B1	515	159.7	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

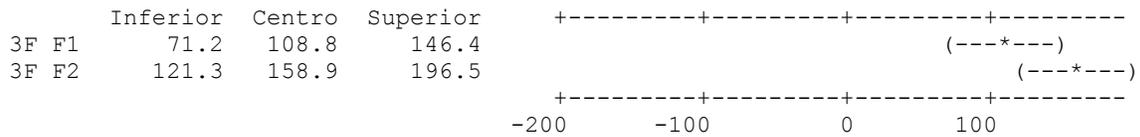
Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.97%

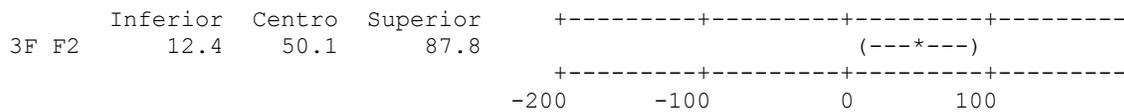
Se restó 3F B1 a:



Se restó 3F B2 a:



Se restó 3F F1 a:



ANOVA unidireccional: 3 Fases D1, D2, E1, E2

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	3	1270256	423419	5.80	0.001
Error	2046	149476850	73058		
Total	2049	150747106			

S = 270.3 R-cuad. = 0.84% R-cuad.(ajustado) = 0.70%

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

Nivel	N	Media	Desv.Est.
3F D1	510	263.8	288.5
3F D2	510	261.2	286.4
3F E1	515	214.9	245.8
3F E2	515	210.7	258.4

Desv.Est. agrupada = 270.3

Agrupar información utilizando el método de Tukey

	N	Media	Agrupación
3F D1	510	263.8	A
3F D2	510	261.2	A
3F E1	515	214.9	B
3F E2	515	210.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones en parejas

Nivel de confianza individual = 98.97%

Se restó 3F D1 a:

	Inferior	Centro	Superior
3F D2	-46.1	-2.6	40.8
3F E1	-92.2	-48.9	-5.6
3F E2	-96.4	-53.1	-9.7

Se restó 3F D2 a:

	Inferior	Centro	Superior
3F E1	-89.6	-46.3	-2.9
3F E2	-93.8	-50.4	-7.1

Se restó 3F E1 a:

	Inferior	Centro	Superior
3F E2	-47.4	-4.1	39.1

ANEXO II Cartel presentado en el XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería



XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería



VII Simposio Internacional de Producción de Alcoholes y Levaduras

CARACTERIZACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE UN MEDIO TRIFÁSICO EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN ESPACIAL DENTRO DE UN FERMENTADOR MODELO

Falcón-Rojas A, Córdova-Aguilar M. S, Galindo E. Departamento de Ingeniería Celular y Biocatálisis, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 2001 Col. Chamilpa C.P. 62250. Cuernavaca. Morelos. México. Fax: 527773138811 email: axelf@ibt.unam.mx

Palabras clave: Videoendoscopia, Fermentación multifásica, Diámetro Sauter.

Introducción.

Los procesos de fermentación multifásica son de gran relevancia dentro de diversas aplicaciones industriales, donde la dispersión determina la eficiencia en la transferencia de masa. La eficiencia puede evaluarse mediante el uso de análisis de imágenes midiendo los diámetros y la distribución de las estructuras que se forman. Con técnicas avanzadas de análisis de imágenes se ha estudiado la dispersión en sistemas de hasta 4 fases en zonas cercanas a la pared del tanque. No obstante, las zonas dentro del tanque, que presentan mayor gradiente de deformación y disipación de energía son las zonas cercanas al impulsor. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la dispersión de gotas de aceite y de burbujas de aire de un sistema modelo trifásico en un punto cercano al impulsor y su comparación con un segundo punto cercano a la pared del tanque agitado.

Metodología.

Se obtuvieron videos de la dispersión utilizando el sistema de videoendoscopia de alta velocidad (1), tanque agitado y fase acuosa (2) previamente reportados. El endoscopio se colocó a 1 cm de la pared del tanque (zona A) y a 1.5 cm del impulsor. Se usó 5 % v/v de aceite de ricino como fase inmiscible. Las condiciones de operación fueron: potencia volumétrica de 0.25 kW/m³ y aireación de 0.25 vvm. El proceso de adquisición de los videos y procesamiento de los d_{32} y distribuciones, así como el tratamiento estadístico ($\alpha=0.05$) de las gotas y burbujas fueron realizados de acuerdo a lo reportado previamente (2).

Resultados y discusión.

El d_{32} de las gotas del punto B fue de 800 μm , mientras que el obtenido en el punto A fue de 1000 μm . Por otra parte, las burbujas presentan un d_{32} de 450 μm en el punto cercano al impulsor (B) y de 770 μm en el punto cercano a la pared del tanque (A). Estos datos confirman que los objetos en las regiones próximas al impulsor tienen un menor diámetro debido al gradiente de deformación mayor presente en dichas zonas. Las distribuciones de diámetros de gotas y burbujas presentan en la zona A (1 cm de la pared) un perfil más amplio con respecto a las distribuciones en la zona B (figura 1 y 2). Esto significa que los objetos en las zonas aledañas al impulsor son de tamaño uniforme, mientras que los objetos que se encuentran en zonas alejadas del impulsor presentan diámetros diversos, dando lugar a una distribución heterogénea. Lo anterior se debe a los fenómenos de rompimiento y coalescencia que tienen

lugar en el medio y que son afectados por la energía disipada y por lo tanto por la posición de los objetos dentro del tanque. Se encontró que existe una diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre las distribuciones de las dos zonas evaluadas.

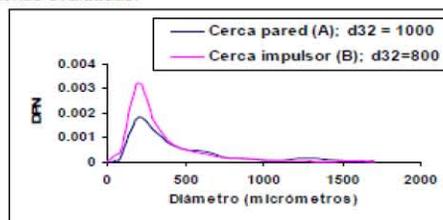


Fig. 1. Distribución de diámetros de gotas

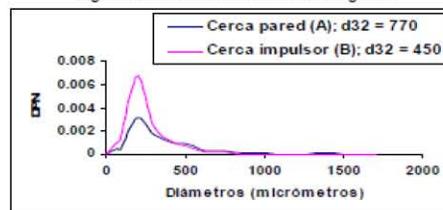


Fig. 2. Distribución de diámetros de burbujas

Conclusiones.

Las gotas de aceite en las zonas cercanas al impulsor tienen un diámetro 200 μm menor que las gotas en las zonas cercanas a la pared. En el caso de las burbujas de aire, la diferencia entre ambos puntos es de 320 μm . Esta diferencia de tamaño entre los dos puntos fue estadísticamente significativa.

Agradecimiento.

Este trabajo fue financiado por CONACYT, proyecto 59807.

Bibliografía

1. Taboada, B., Córdova-Aguilar, M. S., Galindo, E., Corkidi, G. (2006) Aplicación de la videoendoscopia de alta velocidad en la visualización de las interacciones complejas que se llevan a cabo en sistemas multifásicos. Memorias XXI Congreso de Instrumentación SOMI, Ensenada, Baja California, México. 22-25 Octubre 2006, 5 pp.
2. Guevara-López, E., Sanjuán-Galindo, R., Córdova-Aguilar, M. S., Corkidi, G., Ascanio, G., Galindo, E. (2008) High-speed visualization of multiphase dispersions in a mixing tank. *Chem. Eng. Res. Des.*, 86: 1382-1387.

ANEXO III Cartel presentado en el XXIII Foro Norte Americano de Mezclado (NAMF)

