

**MEDICIÓN EXPERIMENTAL CON EL USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA  
DETERMINAR EL DIÁMETRO DE LAS GOTAS DE ACEITE EN AGUA EN UN  
FLUJO MULTIFASICO.**

**SERGIO IVÁN GÓMEZ BERNAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

**MEDICIÓN EXPERIMENTAL CON EL USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA  
DETERMINAR EL DIÁMETRO DE LAS GOTAS DE ACEITE EN AGUA EN UN  
FLUJO MULTIFASICO.**

**SERGIO IVÁN GÓMEZ BERNAL**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR EL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.**

**DIRECTOR**

**DAVID ALFREDO FUENTES DÍAZ**

**Ph.D, M.sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2015**

## DEDICATORIA.

*A Dios, a mi familia, especialmente a Diego, Alba, Hernando y a mi querida madre Amparo Bernal por creer en mí y apoyarme anímicamente, económicamente y sentimentalmente durante toda mi vida, madre esto te lo debo a ti y te lo agradezco con todo el corazón,*

*Gracias.*

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios universitarios en una institución de alta calidad, realizar un intercambio académico en Brasil y a todos los docentes que participaron en mi entrenamiento académico, personal y profesional.

A la escuela de Ingeniería Mecánica y cada uno de sus profesores, especialmente a los profesores Isnardo González Jaimes y David Alfredo Fuentes.

Al laboratorio de Energía Térmica y Fluidos LETeF de la universidad de Sao Paulo, a su director Oscar Mauricio Hernández Rodríguez y compañeros de laboratorio Marlon Hernández, Hugo y esposa, Marcel, Iara, Jonas, Ricardo por permitirme hacer parte de su equipo de trabajo y contribuir en el desarrollo de mi trabajo de grado.

A mis amigos Eymar Andrés, Sergio Silva, Oscar, Juan Sebastián, Álvaro, Juan David, Juan José y demás personas que estuvieron presentes en mi vida durante esta etapa.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	17
<b>1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	18
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	19
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	20
<b>3.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	20
<b>3.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	20
<b>4. FUNDAMENTOS DEL FLUJO MULTIFÁSICO</b> .....	21
4.1 Patrones de flujo multifásico .....	21
4.1.1 Patrones de flujo multifásico en tubería Horizontal .....	22
4.1.1.1 Patrón De Flujo Segregado.....	22
4.1.1.2 Patrón De Flujo Intermitente .....	23
4.1.1.3 Patrón De Flujo Distribuido .....	24
4.1.2 Patrones de flujo líquido-líquido.....	24
<b>5. INSTALACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b> .....	29
5.1 Instalación Experimental Principal .....	29
5.1.1 Sistema de suministro de aceite y agua.....	34
5.1.2 Separador de aceite y agua .....	35
5.1.3 Medidores de Caudal.....	37
5.1.4 Sección de pruebas .....	38
5.1.5 Sección de visualización y adquisición de datos.....	42
5.1.6 Estación de control .....	45
5.1.7 Aparato de adquisición de imágenes .....	46
5.2 Instalación Experimental Básica .....	48

5.3 Procedimiento Experimental .....	50
5.3.1 Experimentos Básicos .....	51
5.3.2 Experimento Principal .....	56
<b>6. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>64</b>
6.1 Resultados Experimentos Básicos.....	64
6.1.1 Resultados Experimentos Básicos con el uso de la cámara de alta velocidad .....	64
6.1.2 Resultados Experimentos Básicos con el uso del sensor medidor de tamaño de partículas ORM .....	67
6.1.3 Comparación entre los Resultados Experimentos Básicos con el uso de la cámara de alta velocidad HSC y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM .....	80
6.2 Resultados Experimento Principal .....	81
6.2.1 Resultados Experimento Principal con el uso de la cámara de alta velocidad .....	81
6.2.1.1 Experimento Principal 1 con el uso de la HSC.....	82
6.2.1.2 Experimento Principal 2 con el uso de la HSC.....	84
6.2.1.3 Experimento Principal 3 con el uso de la HSC.....	87
6.2.1.4 Experimento Principal 4 con el uso de la HSC.....	91
6.2.2 Resultados Experimento Principal con el uso del sensor medidor de tamaño de partículas ORM .....	93
6.2.3 Análisis de resultados del experimento principal .....	110
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>111</b>
<b>8. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>112</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>116</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Trabajos sobre patrones de Flujo Líquido-Líquido.....	27
Tabla 2. Descripción de equipamientos presentes en el LETeF.....	34
Tabla 3. $\lambda_w \lambda_o$ para el Holdup del líquido sin deslizamiento .....	137
Tabla 4. Correlaciones para el cálculo del Holdup, según Beggs & Brill.....	139
Tabla 5. Correlaciones para cada patrón de flujo según Baker .....	143
Tabla 6. Límites para los patrones de flujo según Beggs & Brill .....	146

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Patrones de flujo segregado .....	23
Figura 2. Patrones de flujo intermitente .....	23
Figura 3. Patrones de flujo distribuido.....	24
Figura 4. Patrones de flujo aceite-agua (ALKAYA, JAYAWARDENA Y BRILL, 2000).....	26
Figura 5. Patrones de Flujo observados por Elseth (2001).....	28
Figura 6. Esquema del oleoducto piloto del LETeF .....	31
Figura 7. Oleoducto piloto del LETeF listo para la realización de las pruebas.....	32
Figura 8. Esquema circuito experimental del LETeF .....	33
Figura 9. Inversores de frecuencia.....	35
Figura 10. Bombas helicoidales de suministro de agua y aceite.....	35
Figura 11. Diagrama esquemático del separador de placas coalescentes .....	36
Figura 12. a) Separador de agua y aceite del tipo placas coalescentes, b) Tanque de almacenamiento.....	37
Figura 13. Medidores de caudal del agua: a) Alto caudal; b) Bajo caudal .....	38
Figura 14. Medidores de caudal del aceite: a) Bajo caudal; b) Medio caudal; c) Alto caudal .....	39
Figura 15. Soportes de los tubos y uniones utilizadas en la sección de pruebas .	40
Figura 16. Mezclador de aceite-agua tipo “Y” .....	41
Figura 17. Tubería de acrílico y vidrio de 12m instaladas sobre la estructura metálica inclinable.....	41
Figura 18. Sección de visualización de acrílico: a) Bloque de acrílico diseñado, b) Montaje de la pieza en la tubería de pruebas.....	42
Figura 19. a) Patrón cuadrículado, b) Pieza de acrílico con el patrón, c) Pieza de acrílico mecanizada para insertar el patrón .....	43
Figura 20. Bloque de acrílico con el patrón insertado.....	44
Figura 21. Pieza diseñada para colocar en contacto el sensor ORM y el flujo multifásico en la tubería de pruebas .....	44
Figura 22. Computador para adquisición de señales y emisión de señales de comando .....	45
Figura 23. Interface del programa de adquisición y control en plataforma LabVIEW®.....	46

Figura 24. Cámara de alta Velocidad i-speed 3 Olympus.....	47
Figura 25. Sensor medidor de tamaño de partículas Sequip-ORM.....	48
Figura 26. Muestras de aceite-agua en Becker de plástico .....	49
Figura 27. Instrumentos del Montaje Experimental Básico .....	50
Figura 28. Experimento Básico 1 usando el sensor medidor de tamaño de partículas ORM.....	52
Figura 29. Experimento Básico 2 usando el sensor medidor de tamaño de partículas ORM.....	53
Figura 30. Experimento Básico 3 usando la cámara de alta velocidad.....	55
Figura 31. Experimento Básico 3 usando el sensor ORM .....	55
Figura 32. Tacómetro minipa MDT 2238 .....	56
Figura 33. Experimento principal usando la cámara de alta velocidad .....	57
Figura 34. Interface de conexión Software TeamViewer 9 .....	59
Figura 35. Vista del oleoducto y plataforma .....	59
Figura 36. Experimento principal usando el Sensor ORM .....	61
Figura 37. Experimento principal 2 usando el Sensor ORM .....	63
Figura 38. Experimento básico con una fracción de agua 0.3 – aceite 0.7.....	65
Figura 39. Cálculo del diámetro de las gotas con el uso de la HSC .....	66
Figura 40. Cálculo del diámetro de las gotas con fracción de agua 0.5 y aceite 0.5 .....	66
Figura 41. Gráfica 1 Número de gotas experimento básico 1 .....	68
Figura 42. Gráfica 2 Número de gotas experimento básico 1 .....	69
Figura 43. Gráfica 3 Número de gotas experimento básico 1 .....	70
Figura 44. Gráfica 4 Número de gotas experimento básico 1 .....	71
Figura 45. Gráfica 1 Número de gotas experimento básico 2.....	72
Figura 46. Gráfica 2 Número de gotas experimento básico 2.....	73
Figura 47. Gráfica 3 Número de gotas experimento básico 2.....	74
Figura 48. Gráfica 4 Número de gotas experimento básico 2.....	75
Figura 49. Gráfica 1 Número de gotas experimento básico 3.....	76
Figura 50. Gráfica 2 Número de gotas experimento básico 3.....	77
Figura 51. Gráfica 3 Número de gotas experimento básico 3.....	78
Figura 52. Gráfica 4 Número de gotas experimento básico 3.....	79
Figura 53. Gotas experimento principal 1 con velocidades superficiales de 0,1(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua .....	82

Figura 54. Gotas pequeñas Experimento Principal 1 con aumento de fps .....	83
Figura 55. Gotas experimento principal 2 con velocidades superficiales de 0,12(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua.....	85
Figura 56. Gotas pequeñas Experimento Principal 2 con aumento de fps .....	86
Figura 57. Gotas experimento principal 3 con velocidades superficiales de 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua.....	87
Figura 58. Gotas experimento principal 3 con geometría ovalada .....	88
Figura 59. Gotas pequeñas Experimento Principal 3 con aumento de fps .....	89
Figura 60. Flujo multifásico: a) Experimento Principal 1, b) Experimento Principal 2, c) Experimento Principal 3 .....	90
Figura 61. Gotas experimento principal 4 con velocidades superficiales de 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua .....	91
Figura 62. Gotas pequeñas Experimento Principal 4.....	92
Figura 63. Flujo multifásico experimento principal 4 .....	93
Figura 64. Gráfica 1 Número de gotas experimento principal 1 .....	94
Figura 65. Gráfica 2 Número de gotas experimento principal 1 .....	95
Figura 66. Gráfica 3 Número de gotas experimento principal 1 .....	96
Figura 67. Gráfica 4 Número de gotas experimento principal 1 .....	97
Figura 68. Gráfica 1 Número de gotas experimento principal 2.....	98
Figura 69. Gráfica 2 Número de gotas experimento principal 2.....	99
Figura 70. Gráfica 3 Número de gotas experimento principal 2.....	100
Figura 71. Gráfica 4 Número de gotas experimento principal 2.....	101
Figura 72. Gráfica 1 Número de gotas experimento principal 3.....	102
Figura 73. Gráfica 2 Número de gotas experimento principal 3.....	103
Figura 74. Gráfica 3 Número de gotas experimento principal 3.....	104
Figura 75. Gráfica 4 Número de gotas experimento principal 3.....	105
Figura 76. Gráfica 1 Número de gotas experimento principal 4.....	106
Figura 77. Gráfica 2 Número de gotas experimento principal 4.....	107
Figura 78. Gráfica 3 Número de gotas experimento principal 4.....	108
Figura 79. Gráfica 4 Número de gotas experimento principal 4.....	109
Figura 80. Esquema del flujo multifásico de fases separadas .....	135
Figura 81. Correlación de Lockhart & Martinelli y las observaciones de Becker. ....	140
Figura 82. Correlación de Holdup para mezclas Gas-Líquido .....	141
Figura 83. Relaciones de Lockhart-Martinelli.....	142

Figura 84. Función de Ducler, Wicks & Cleveland .....	145
Figura 85. Mapas de Regimenes de Rodriguez y Oliemans (2006) para flujo de aceite-agua: (a) Horizontal, (b) -5°, (c) 5° .....	149
Figura 86. Mapa de régimen de Banwart (2004) para flujo horizontal .....	152
Figura 87. Mapa de Regímenes de flujo, Baker (1953) .....	152
Figura 88. Mapa de Regímenes de flujo, Baker (1953) .....	153
Figura 89. Mapa de Regímenes de flujo, Baker (1953) .....	154
Figura 90. Mapa de regímenes de flujo Taitel-Dukler (1976).....	156
Figura 91. Mapa del patrón de flujo Beggs & Brill .....	156
Figura 92. Interface Software Olympus i-speed Suite.....	158
Figura 93. Imágenes del video Software Olympus i-speed Suite.....	159
Figura 94. Working View Software Olympus i-speed Suite .....	159
Figura 95. Calibrate Software Olympus i-speed Suite .....	160
Figura 96. Calibrate Software Olympus i-speed Suite .....	161
Figura 97. Interface Software MCSA Sequip-WinORM.....	162
Figura 98. System-Device Setup Software MCSA Sequip-WinORM .....	162
Figura 99. Device Setup Software MCSA Sequip-WinORM .....	163
Figura 100. Crear o abrir un archivo - Software WinORM .....	164
Figura 101. Software WinORM a) Archivo Nuevo, b) Archivo ya existente.....	164
Figura 102. Measurement Setup a) Como abrir la Ventana b) Ventana de selección.....	165
Figura 103. Configuraciones matemáticas a) Como abrir la ventana, b) Ventana de selección.....	166
Figura 104. Selección de diámetro mínimo y máximo hipotético de las gotas ....	167

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Patrones de flujo por Souza de Castro.....	114
Anexo B. Planos soporte ORM.....	125
Anexo C. Datos del sensor ORM experimento principal 1.....	129
Anexo D. Datos del sensor ORM experimento principal 2.....	130
Anexo E. Datos del sensor ORM experimento principal 3.....	131
Anexo F. Datos del sensor ORM experimento principal 4.....	132
Anexo G. Fundamentos de flujo multifásico.....	133
Anexo H. Software i-speed Suit y Software MCSA Sequip-winORM.....	157
Anexo I. Datos del sensor ORM experimento básico 1.....	168
Anexo J. Datos del sensor ORM experimento básico 2.....	169
Anexo K. Datos del sensor ORM experimento básico 3.....	170

## RESUMEN

**TÍTULO: MEDICIÓN EXPERIMENTAL CON EL USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA DETERMINAR EL DIÁMETRO DE GOTAS DE ACEITE EN AGUA EN UN FLUJO MULTIFÁSICO<sup>1</sup>.**

**AUTOR: SERGIO IVÁN GÓMEZ BERNAL\*\*.**

**PALABRAS CLAVE:** Flujo Multifásico, HSC, ORM.

### DESCRIPCIÓN

El transporte de petróleo y cualquier tipo de fluido es un campo en investigación que ha crecido exponencialmente durante los últimos años, ya que actualmente se han desarrollado diversos equipos para analizar los múltiples fenómenos que se presentan en los fluidos según la velocidad a la que son transportados, la viscosidad que poseen, la temperatura, el material del ducto o tubería, entre otros factores que pueden alterar las características del fluido. Uno de las principales causas que han llevado a estas investigaciones son las grandes pérdidas de energía y de crudo que se presentan durante la extracción, lo cual conlleva a tener pérdidas económicas en las empresas extractoras y deficiencia en la explotación.

El determinar el diámetro de las gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico con el uso de instrumentos de medición como lo son la cámara de alta velocidad HSC y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM contribuirá a las nuevas investigaciones que se están llevando a cabo en el análisis de flujo multifásico, con el principal objetivo de aumentar la eficiencia y disminuir los costos en el transporte del petróleo, además afianza la relación entre universidad – empresa para contribuir a la generación de investigación.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ingeniero Mecánico David Alfredo Fuentes Díaz.

## ABSTRACT

**TITLE: EXPERIMENTAL MEASUREMENT WITH THE USE OF NEW TECHNOLOGIES FOR DETERMINING THE DIAMETER OF DROPS OF OIL IN WATER IN A MULTIPHASE FLOW<sup>2</sup>.**

**AUTHOR: SERGIO IVÁN GÓMEZ BERNAL\*\* .**

**KEYWORDS:** Multiphase flow, HSC, ORM.

### DESCRIPTION

The oil transport and any type of fluid is a research field that has grown exponentially in recent years, since there are currently various devices developed to analyze the many phenomena that occur in the fluids according to the speed at which they are transported, his viscosity, temperature, pipe material or duct material, among other factors that can alter the characteristics of the fluid. One of the main causes that led to these investigations are large energy losses and crude that occur during the extraction, which leads to economic losses that have extractor companies and deficiency in the operation.

Determining the diameter of the oil droplets that are transferred to water in a multiphase flow using measuring instruments such as high speed camera (HSC) and the measurement sensor (ORM), will contribute to new investigations that have carried on in multiphase flow analysis, with the main objective to increase efficiency and reduce costs in the transport of oil, besides, support the relation between university – company to contribute the generation investigation.

---

<sup>2</sup> Graduation Project

\*\* Faculty Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Mechanical Engineer David Alfredo Fuentes Díaz.

## **INTRODUCCIÓN.**

Este proyecto se llevó a cabo en el laboratorio de energía térmica y fluidos LETeF de la escuela de Ingeniería de Sao Carlos de la Universidad de Sao Paulo, (EESC-USP), en la ciudad de Sao Carlos, Brasil, donde el autor realizó un intercambio académico gracias al convenio que existe entre la UIS y la USP.

El transporte de petróleo y cualquier tipo de fluido es un campo en investigación que ha crecido exponencialmente durante los últimos años, ya que actualmente se han desarrollado diversos equipos para analizar los múltiples fenómenos que se presentan en los fluidos según la velocidad a la que son transportados, la viscosidad que poseen, la temperatura, el material del ducto o tubería, entre otros factores que pueden alterar las características del fluido. Uno de las principales causas que han llevado a estas investigaciones son las grandes pérdidas de energía y de crudo que se presentan durante la extracción, lo cual conlleva a tener pérdidas económicas en las empresas extractoras y deficiencia en la explotación.

En este proyecto se propuso emplear un modelo experimental que hace uso de nuevas tecnologías de medición cuya aplicación no se ha encontrado en la literatura revisada para este tipo de problemas. En particular, se tuvo a disposición una cámara de alta velocidad que puede realizar videos y ver el flujo multifásico detalladamente, adicionalmente, con el software de la cámara se pudo calcular el tamaño de las gotas de aceite en agua en un flujo multifásico; por otro lado el sensor medidor de tamaño de partículas ORM es un dispositivo construido específicamente para medir el número y cantidad de partículas con geometría circular como las gotas de aceite en agua que se propuso medir.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

El flujo multifásico, en especial el flujo multifásico aceite – agua, viene atrayendo la atención de investigadores debido a la alta demanda por el combustible fósil en el actual escenario petrolero mundial y nacional. Los desafíos tecnológicos que se presentan en los nuevos descubrimientos de reservas de crudos pesados y altamente viscosos, han llevado a la necesidad de encontrar nuevas propuestas para disminuir las pérdidas de energías en las líneas de transporte del crudo. LETeF es un laboratorio que cuenta con instrumentación de alta precisión y una estructuras diseñadas para realizar experimentos referentes al flujo multifásico con el fin de estudiar los múltiples fenómenos que acontecen en el flujo multifásico aceite-agua y así encontrar soluciones y nuevas propuestas para garantizar mayor eficiencia y menos gastos a la industria petrolera.

Con base en lo anterior, se propuso realizar un estudio entre la Universidad Industrial de Santander y uno de los laboratorios de investigación líderes en el análisis de flujo multifásico presente en el transporte de petróleo, llamado Laboratorio de Ingeniería Térmica y Fluidos (LETeF) de la Escuela de Ingeniería de San Carlos-USP en la ciudad de San Carlos, Brasil, donde se llevó a cabo la propuesta del uso de nuevas tecnologías para el análisis de flujo multifásico presente en el transporte del petróleo, específicamente estudiar el tamaño de las gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico, ya que este experimento no cuenta con suficiente información en la literatura y puede ser el inicio de una nueva propuesta que contribuya en un futuro a disminuir las pérdidas de energía, de crudo y evitar daños en nuestro medio ambiente en la extracción y transporte del petróleo.

## 2. JUSTIFICACIÓN.

La necesidad de buscar nuevas alternativas tecnológicas para la extracción del petróleo es la meta del Laboratorio de Ingeniería Térmica y Fluidos (LETeF), donde gracias a la contribución económica de empresas como Statoil y Petrobras Brasil, se realizan investigaciones a diario para proponer y mejorar los métodos actuales de extracción de petróleo. LETeF desea realizar investigaciones que sean confiables, seguras y garantizar el crecimiento de la industria del petróleo. Esto producirá mayores ingresos a las compañías, disminución de pérdidas de energía en el proceso de extracción, efectividad en los procesos, disminución de gases y calor hacia el medio ambiente y aumento en la inversión económica de las empresas a las universidades para continuar con futuras investigaciones.

La investigación contó primero con pruebas básicas para verificar el estado de los equipos de medición y su forma de uso, posteriormente se llevó a cabo una adaptación experimental de los flujos multifásicos presentes en el transporte de petróleo mediante el uso de una estructura a escala llamada oleoducto piloto diseñada para simular el transporte del petróleo, ubicada en el Laboratorio de Ingeniería Térmica y Fluidos (LETeF) de la Escuela de Ingeniería de San Carlos, USP, Brasil.

Realizado el proyecto en su totalidad brindará a la comunidad científica e industrial una solución alternativa para medir el tamaño de gotas de aceite en agua en un flujo multifásico, donde con este tamaño de gota el laboratorio de Ingeniería Térmica y Fluidos (LETeF) realizará nuevas investigaciones para contribuir al mejoramiento y disminución de costos en la industria del petróleo.

### 3. OBJETIVOS.

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL.

Contribuir a la misión de la Universidad Industrial de Santander, mediante una medición experimental con el uso de nuevas tecnologías para determinar el diámetro de las gotas de aceite en agua en un flujo multifásico, afianzando la relación universidad-investigación-empresa.

#### 3.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Calcular el diámetro y número de gotas producidas en un flujo multifásico aceite-agua usando los instrumentos de medición cámara de alta velocidad y sensor ORM para las siguientes fracciones de aceite-agua: agua 0.5 – aceite 0.5, agua 0.3 – aceite 0.7, agua 0.15 – aceite 0,85.
- Comparar los diámetros de las gotas calculados con la cámara de alta velocidad con los diámetros medidos por el sensor ORM para las siguientes fracciones de aceite-agua: agua 0.5 – aceite 0.5, agua 0.3 – aceite 0.7, agua 0.15 – aceite 0,85.
- Determinar el diámetro y número de gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico aceite-agua estratificado con mistura en la interface y un flujo multifásico aceite-agua anular con el uso de los instrumentos de medición cámara de alta velocidad y sensor ORM.

## **4. FUNDAMENTOS DEL FLUJO MULTIFÁSICO.**

El flujo multifásico se define como el flujo simultáneo de dos o más fases (en estado líquido, sólido o gaseoso) en una tubería de conducción. En la industria del petróleo, el flujo multifásico se presenta en tuberías de superficie y en los pozos de producción de gas y aceite (la mayoría de pozos que producen líquidos producen algo de gas y viceversa).

Todos los intentos realizados para obtener una solución general para el problema del flujo multifásico han caído en el vacío, aun así se ha observado una asociación natural, es decir, para cada patrón hay un comportamiento similar, esto hace que el problema sea algo más fácil, se analiza cada patrón por separado. De esta manera, el método lógico indica primero que hay que predecir el patrón de flujo en la tubería, y una vez determinado se desarrolla un modelo por separado el cual prediga las características del flujo, como caída de presión, hold up del líquido y el coeficiente de transferencia de calor.

Para desarrollar este proyecto, fue necesario buscar en la literatura los conocimientos básicos de los tipos de patrones de flujo multifásico que se pueden formar en una tubería horizontal, por otro lado, si el lector desea estudiar con más detalle los fundamentos básicos del flujo multifásico, puede revisar la bibliografía enunciada en este trabajo y/o mirar el anexo G .

### **4.1 Patrones de flujo multifásico.**

Se definen los patrones de flujo multifásico como una descripción cualitativa de la distribución de las fases en la tubería. Describe la forma en que se distribuyen las fases en un segmento de tubería. El patrón de flujo es influenciado por la geometría de la tubería, por las propiedades físicas de la mezcla (densidad, tensión superficial, viscosidad) y por las tasas de flujo.

Cuando la tubería posee una inclinación mayor que  $\pm 5$  grados, ya sea por la topografía del terreno o por razones de conveniencia, no se puede considerar la tubería como una tubería horizontal. Aunque los patrones de flujo en tubería inclinada se consideran como si fuera una tubería horizontal (los patrones de Beggs y Brill), se tiene que los valores de las caídas de presión y holdup son diferentes y son más complicados de determinar.

#### **4.1.1 Patrones de flujo multifásico en tubería Horizontal.**

Se considera flujo en tubería horizontal, el flujo que fluye por una tubería cuya elevación no supera los  $\pm 5$  grados.

Los patrones de flujo no afectan la presión significativamente en flujo horizontal como sí sucede en el vertical. En el flujo horizontal la energía potencial no influye. De todos modos esto no indica que estos patrones de flujo horizontal no se tengan en cuenta. Pueden afectar las operaciones de producción y algunas correlaciones para caídas de presión los consideran.

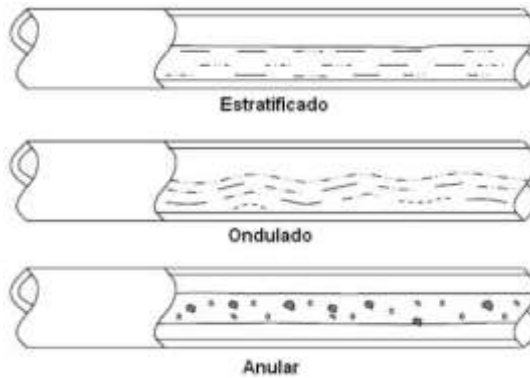
Aunque se han realizado muchas descripciones y tipificaciones de los patrones de flujo (Alves definió ocho regímenes, Degance y Aterton definieron tres categorías), actualmente se usan las categorías definidas por Beggs y Brill las cuales son definidas a continuación.

##### **4.1.1.1 Patrón De Flujo Segregado.**

El flujo segregado es aquel en el que las fases se encuentran, en su mayor parte, separadas. Se subdivide en tres regímenes: flujo estratificado, flujo ondular y flujo anular. El primero se caracteriza porque el líquido va fluyendo por la parte baja de la tubería, mientras el gas fluye a lo largo del tope de la tubería, con una interface lisa entre las fases. Éste régimen ocurre cuando las tasas de las fases son relativamente bajas. A tasas más altas la interface comienza a ondularse, originándose el flujo ondular. Por último el flujo anular ocurre cuando hay tasas altas de gas y tasas relativamente altas de líquido. Éste flujo consiste de una capa

fin de líquido en las paredes de la tubería y una fase gaseosa con pequeñas gotas de líquido fluyendo por la parte central de la tubería.

Figura 1. Patrones de flujo segregado.

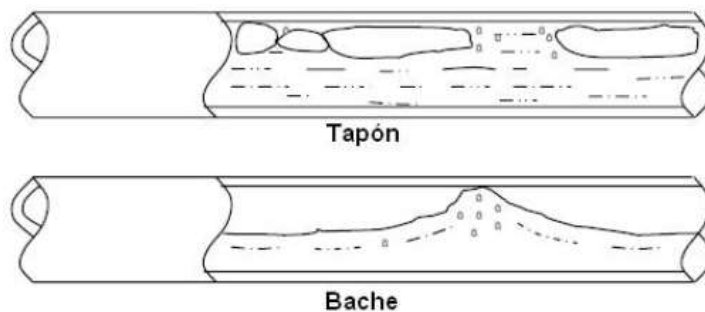


Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

#### 4.1.1.2 Patrón De Flujo Intermitente.

El patrón de flujo intermitente es aquel en el cual el gas y el líquido fluyen alternadamente a través de la tubería. Se divide en dos regímenes de flujo: flujo bache y flujo tapón. El flujo bache consiste en grandes baches de líquido alternado con burbujas de gas a alta velocidad llenando la mayor parte de la tubería. El flujo tapón se distingue por el flujo de grandes burbujas de gas a lo largo de toda la tubería.

Figura 2. Patrones de flujo intermitente.

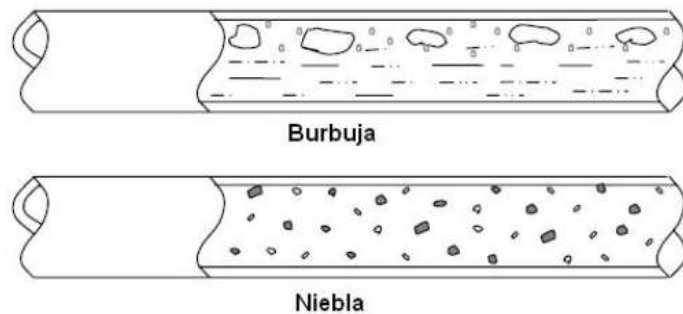


Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

#### 4.1.1.3 Patrón De Flujo Distribuido.

Este flujo se caracteriza por una fase que se encuentra dispersa en la otra y se divide en dos regímenes: flujo tipo burbuja y flujo tipo niebla o disperso. El flujo tipo burbuja. El flujo tipo niebla se presenta a altas tasas de gas y bajas tasas de líquido. Este régimen de flujo es considerado semejante al flujo anular, por lo que muchos mapas de patrones de flujo usan el nombre niebla-anular para denotar estos regímenes.

Figura 3. Patrones de flujo distribuido.



Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

Beggs y Brill definieron un nuevo patrón denominado Transición debido a que, cuando el patrón cambia de segregado a intermitente en determinada zona, observaron un decrecimiento grande pero lento de la fracción de líquido retenido que no era tan rápido como lo indicaban las ecuaciones.

#### 4.1.2 Patrones de flujo líquido-líquido.

Flujos líquido - líquido están presentes en gran parte de la industria petrolera, sin embargo, el estudio de estos flujos aún es insuficiente y relativamente reciente. Debido a la gran capacidad de transferencia de cantidad de movimiento, la alta viscosidad y masa específica de los fluidos, y también al impulso menor, estos flujos presentan patrones diferentes de los flujos gas-líquido.

En las líneas horizontales los principales patrones observados son:

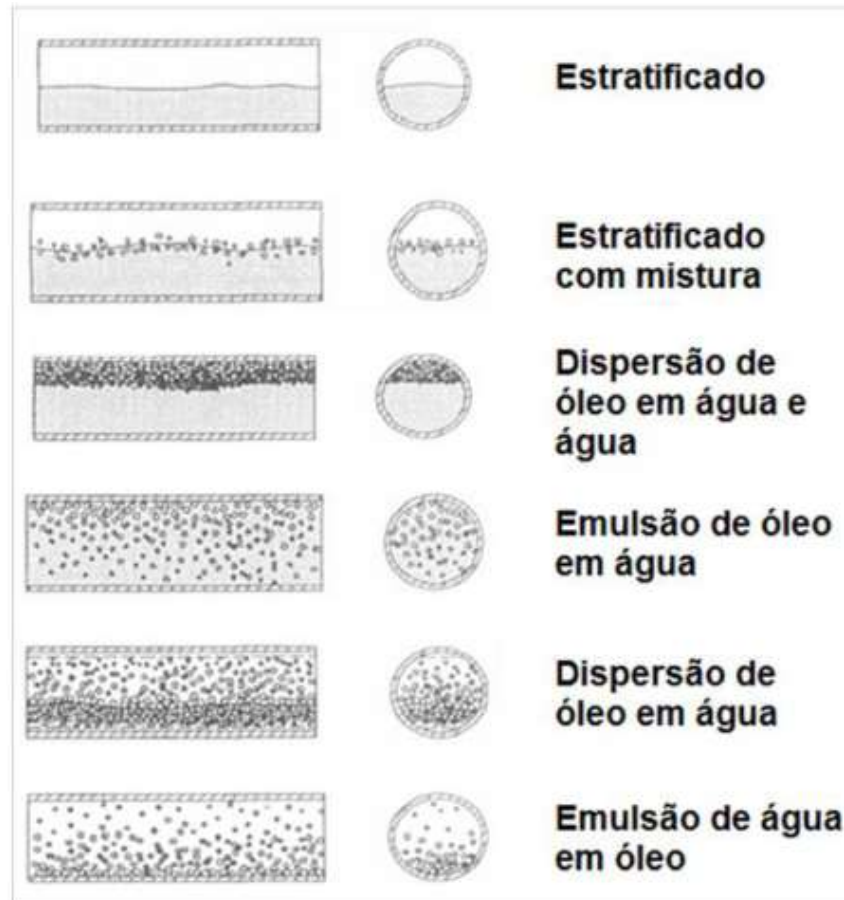
- Estratificado (ST): La fase menos densa fluye en la parte superior y la más densa en la parte inferior. El flujo dominado por la gravedad puede presentar o no ondas en la interface. En general, cuando se presentan ondas en la interface es denominado estratificado ondulado (SW).
- Estratificado con mezcla en la interface (ST&MI): Es la misma descripción del flujo estratificado, sin embargo son observadas gotas de aceite y/o gotas de agua junto a la interface líquido-líquido.
- Dispersión de aceite en agua y agua (Do/w&w): Fase aceitosa dispersa en la fase agua por los vórtices acuosos. Gotas de aceite pequeñas.
- Emulsión de aceite en agua (o/w): Dispersión densa del aceite en la fase agua.
- Emulsión de agua en aceite (w/o): Dispersión densa de agua en la fase aceite.
- Dispersión de aceite en agua y dispersión de agua en aceite (Do/w&Dw/o): Patrón doble, donde las dos dispersiones coexisten.

Para altas viscosidades, aún puede ocurrir:

- Gotas alargadas de aceite en agua o *oil plug flow* (P): Descrito por Lum, Al-Wahaibi y Angeli (2006).
- Anular o *Core-flow* (A): Descrito por Banwart (2004).

La figura 4 presenta la clasificación de los patrones de flujo según Alkaya, Jayawardena y Brill (2000) y en la tabla 1 se presentan algunos trabajos sobre los patrones de flujo líquido-líquido.

Figura 4. Patrones de flujo aceite-agua (ALKAYA, JAYAWARDENA Y BRILL, 2000).



Fuente: Souza de Castro.

Pocos trabajos sobre la ocurrencia de flujos bifásicos líquido-líquido en tubos son encontrados en la literatura. Dentro de ellos, se pueden citar los trabajos de Trallero(1995), y Alkaya, Jayawardena y Brill (2000), donde estos presentan seis tipos básicos de patrones de flujo aceite-agua en tubos horizontales. Los trabajos anteriores son experimentales, Trallero (1995), desarrolló su trabajo en tubos de 2", y Alkaya, Jayawardena y Brill (2000), también en tubos de 2", sin embargo, Trallero (1995) presentó únicamente pruebas en tubos horizontales, mientras que Alkaya, Jayawardena y Brill (2000) en tubos horizontales y levemente inclinados. Aún sobre la ocurrencia de patrones de

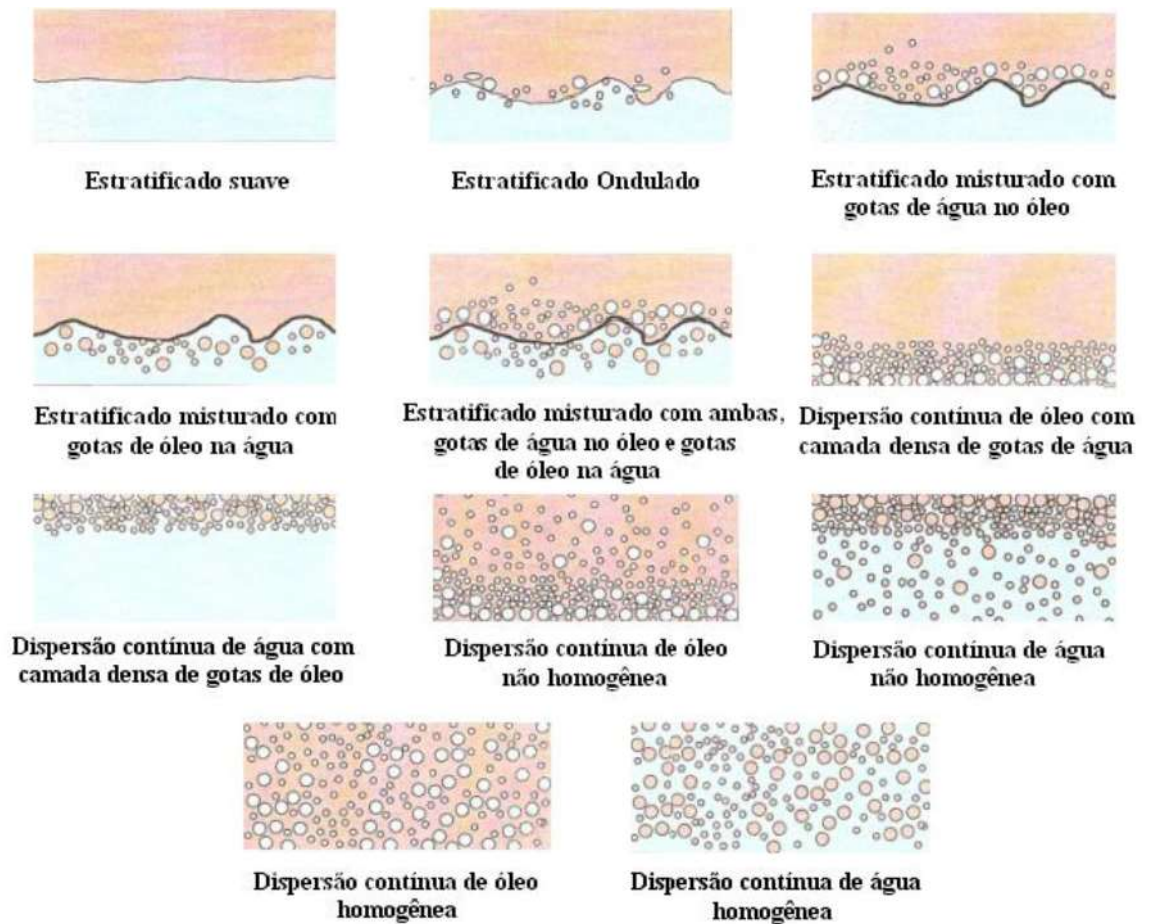
flujo en tubos horizontales, se tiene el trabajo de Elseth (2001), estudiando el flujo aceite-agua en tubo horizontal de 56,3 mm de diámetro interno, observando los patrones de la Figura 5.

Tabla 1. Trabajos sobre patrones de Flujo Líquido-Líquido.

Autor	Diámetro	Inclinación	Fluidos	Tubulación	Padrões Observados	Técnica de Identificação de Padrão
Trallero, 1995	50 mm	0°	Óleo (29 mPa.s e 884 kg/m <sup>3</sup> ) e água	Acrílico	ST, ST&MI, Do/w&w, Do/w&Dw/o, o/w e w/o	Observação Visual e Sondas condutivas e de impedância
Angeli e Hewitt, 2000	25,4 mm	0°	Óleo (1,6 mPa.s e 801 kg/m <sup>3</sup> ) e água	Acrílico e aço inox	ST, ST&MI, Do/w&w, Do/w&Dw/o	Observação Visual e Sondas condutivas e de impedância
Elseth, 2001	56,3 mm	0°	Óleo (1,64 mPa.s e 801 kg/m <sup>3</sup> ) e água	Vidro	ST, ST&MI, Do/w&w, Do/w&Dw/o, o/w e w/o	Observação Visual e Densitometria por raios gama.
Oddie et al., 2003	150 mm	8° a 90°	Querosene (1,5 mPa.s e 810 kg/m <sup>3</sup> ) e água	PMMA	ST, ST&MI, Do/w&w, Do/w&Dw/o, o/w e w/o	Observação Visual e Densitometria por raios gama.
Bannwart et al. (2004)		0° e 90°	Óleo (500 mPa.s e 935 kg/m <sup>3</sup> ) e água	Acrílico	ST, G, GD, A, p	Observação Visual
Rodriguez e Oliemans, 2006	82,8 mm	-5°, -2°, -1,5°, 0°, 1°, 2°, 5°.	Óleo (7 mPa.s e 831,4 kg/m <sup>3</sup> ) e água	-	ST, SW, ST&MI, Do/w&w, Do/w&Dw/o, o/w e w/o	Observação Visual e Assinatura de Pressão.

Fuente: Souza de Castro.

Figura 5. Patrones de Flujo observados por Elseth (2001).



Fuente: Souza de Castro.

Es importante resaltar que Elseth (2001) presenta una mayor división de los patrones, sin embargo, esos aún pueden ser agrupados en la clasificación de Alkaya, Jayawardena y Brill (2000).

## 5. INSTALACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos en este proyecto será presentada la instalación experimental utilizada en el laboratorio de Ingeniería térmica y fluidos LETeF de la escuela de Ingeniería de Sao Carlos de la Universidad de Sao Paulo, (EESC-USP), como los medidores de caudal, separador de agua y aceite, estación y control, entre otros, además de la nueva instrumentación utilizada para la medición del tamaño de las gotas de aceite en agua en un flujo multifásico líquido-líquido. También será presentado el programa utilizado para controlar el oleoducto piloto, el cual fue LabVIEW®, además del procedimiento experimental para la adquisición de los datos.

### 5.1 Instalación Experimental Principal.

El desarrollo del trabajo experimental principal fue realizado en la estructura experimental llamada “oleoducto piloto” con capacidad de inclinación y perteneciente al LETeF (Figuras 18 y 19), siendo que este oleoducto ya contiene la instrumentación necesaria, y en estado operativa, posee la caracterización de los patrones de flujo, medidas de la caída de presión bifásica y de la fracción volumétrica *in situ* en flujos bifásicos gas-líquido, líquido-líquido y trifásico líquido-líquido-gas. La línea de pruebas está compuesta de tubos de vidrio borosilicato y tubos de acrílico con 12m de longitud y 26mm de diámetro interno con espesor de 2mm y una línea *by-pass* para la medición de la fracción volumétrica *in situ* a través de la técnica de cierre rápido.

El suministro de aceite y agua es hecho por bombas de desplazamiento positivo controladas por variadores de frecuencia. Las mediciones de caudal son hechas en la línea de agua por dos medidores de caudal, uno de engranajes con intervalo de medición entre 1 y 35 l/min y el segundo tipo vortex con intervalo de medición de 30 a 1600 l/min. La línea de aceite cuenta con tres medidores de caudal de engranajes con intervalos de medición de 0,042 a 13,8 l/min, de 2,5 a 106,7 l/min y de 6,67 a 233,3 l/min.

En la línea de aceite hay termopares (Tipo K) para medir la temperatura y definir sus características físicas, se considera que la temperatura del agua es aproximada a la temperatura del aceite. Las líneas de aceite y agua poseen manómetros para el control de la presión y por seguridad, para evitar el rompimiento de los tubos y/o accidentes.

En la parte final de las tuberías, los fluidos son dirigidos a un separador de placas coalescentes y los fluidos vuelven a los tanques de almacenamiento.

Para la medición experimental de este trabajo, fue necesaria la instalación de unas piezas diseñadas para facilitar la medida del sensor ORM y para la obtención de un mejor video con el uso de la cámara de alta velocidad.

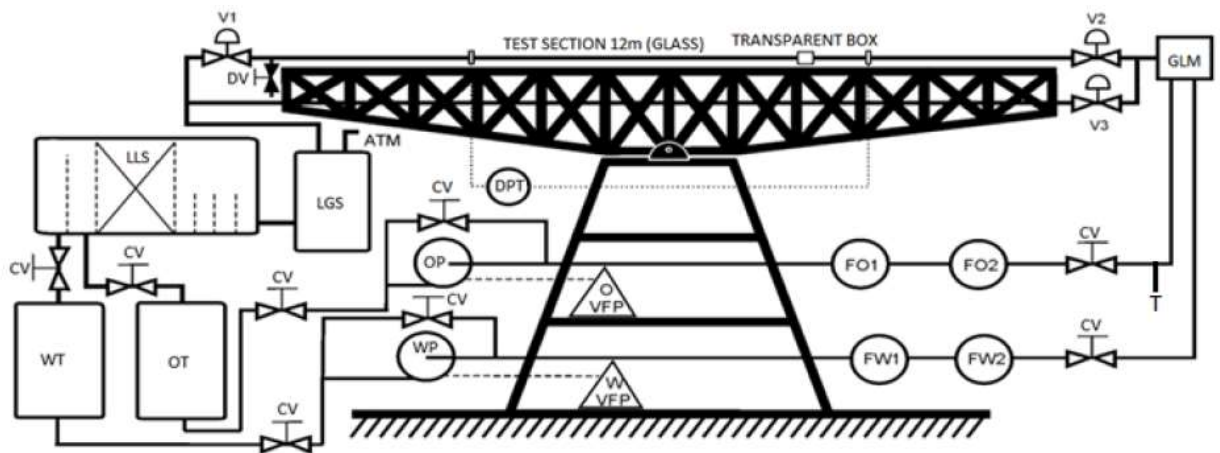
Los fluidos utilizados fueron: aceite mineral con una viscosidad aproximada de 300 cP a 25°C y densidad aproximada de 880 Kg/m<sup>3</sup>, y el agua con una viscosidad de 1 cP y densidad aproximada de 1000 Kg/m<sup>3</sup>, y aire atmosférico. Las características de los fluidos varían a lo largo de las pruebas, pero se supone que las características no varían.

Fueron simulados experimentalmente diversos patrones de flujo aceite-agua para observar la formación de las gotas de aceite en agua. Inicialmente los tubos fueron retirados del oleoducto de forma manual para posteriormente limpiarlos internamente y externamente con el uso de agua a presión y jabón líquido casero. Después de la limpieza de los tubos, estos fueron ensamblados en el oleoducto nuevamente, luego se inyectó un flujo de agua por el interior de la tubería, se aprisionó y finalmente fue extraída. Esto garantiza que toda la pared de la tubería este mojada por agua de forma homogénea antes del inicio de los experimentos. Los fluidos son inyectados por un mezclador en "Y", donde el agua entra por la parte inferior y el aceite por la parte superior, facilitando la formación del flujo estratificado. Las pruebas fueron realizadas en busca de la mejor secuencia de inyección, sin embargo no afectó el hecho de inyectar primero el aceite o el agua, pero finalmente se inyectó primero agua y posteriormente el aceite.

Las gotas de aceite en agua fueron grabadas a lo largo de la tubería mediante el uso de un acuario diseñado para ser ensamblado en una sección de la tubería y hecho con un material que facilitaba la visión del patrón de flujo y la toma del video, por otro lado la medición del tamaño de las gotas de aceite mediante la técnica de medición con el uso del sensor se llevó a cabo de forma similar, ya que fue diseñada otra pieza que fue ensamblada en la tubería y así colocar en contacto el sensor con las gotas de aceite.

En la Figura 6 se puede observar un gráfico del oleoducto piloto inclinable del LETeF y en la Figura 7 se puede observar el oleoducto en una imagen tomada por el autor; en la Figura 8 se encuentra el esquema del oleoducto y en la tabla 2 serán presentados de forma breve los principales equipamientos que componen la línea de pruebas.

Figura 6. Esquema del oleoducto piloto del LETeF.

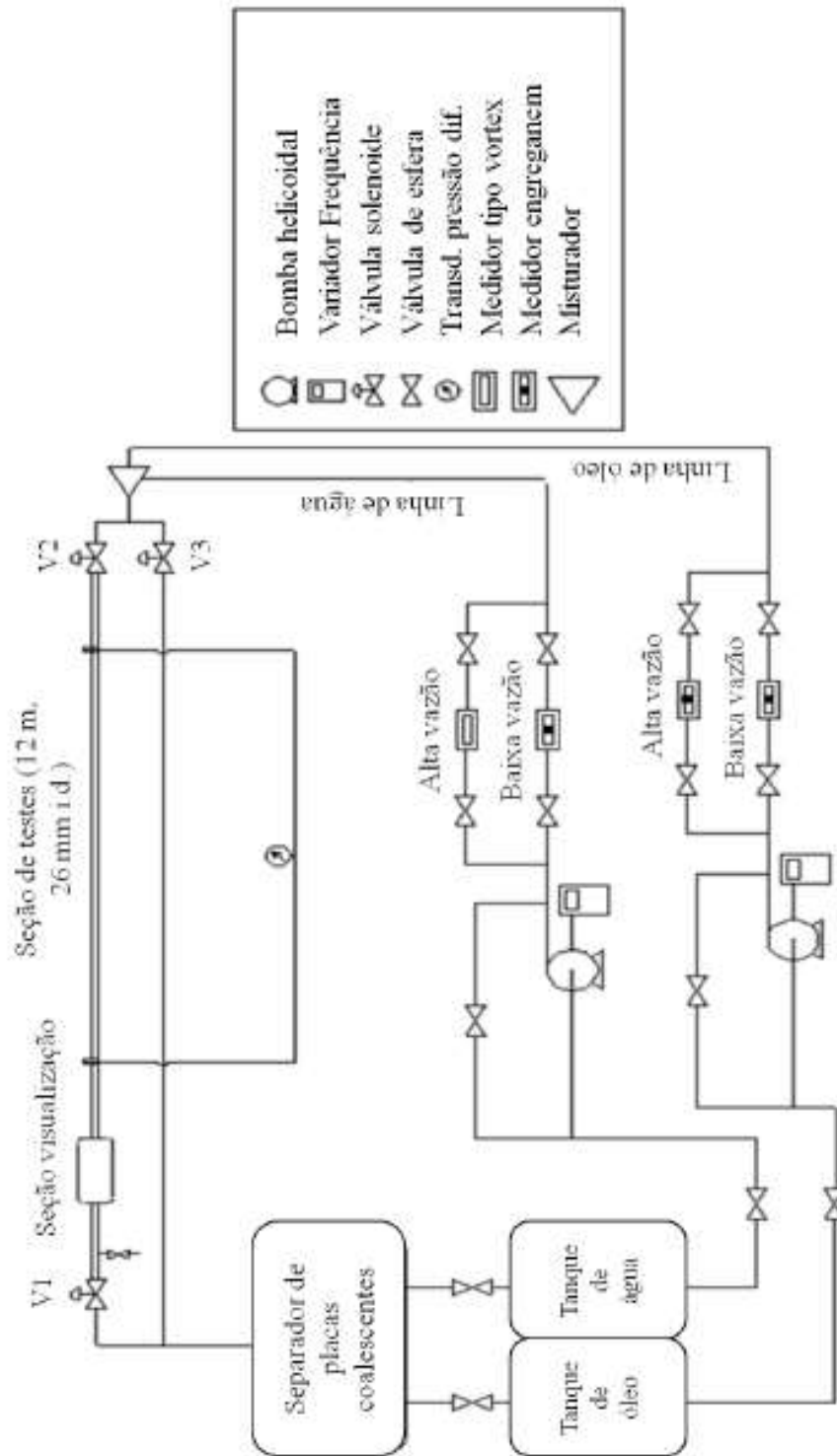


Fuente: Souza de Castro.

Figura 7. Oleoducto piloto del LETeF listo para la realización de las pruebas.



Figura 8. Esquema circuito experimental del LETeF.



Fuente: Souza de Castro.

Tabla 2. Descripción de equipamientos presentes en el LETeF.

Código	Equipamento	Código	Equipamento
OT	Reservatório de óleo	W VFP	Variador de frequência para bomba de água
WT	Reservatório de água	O VFP	Variador de frequência para bomba de óleo
OP	Bomba de óleo	FO1 e FO2	Medidores de vazão de óleo
WP	Bomba de água	FW1 e FW2	Medidores de vazão de água
CV	Válvulas de controle	GLM	Misturador óleo-água-ar
LLS	Separador água-óleo	DV	Válvula para drenagem
LGS	Separador de gás intermediário	V1, V2 e V3	Válvula de fechamento rápido
T	Ternopar	DPT	Transdutor de pressão diferencial

Fuente: Souza de Castro.

### 5.1.1 Sistema de suministro de aceite y agua.

El agua y el aceite mineral quedan almacenados separadamente en tanques de polipropileno (Figura 12b) y son bombeados hacia la línea de pruebas a través de bombas de desplazamiento positivo helicoidales del tipo tornillo, accionadas remotamente por inversores de frecuencia de 12 KW (Figura 9). Para el bombeo del agua fue utilizada una bomba de marca Weatherford con potencia de accionamiento de 15 CV y potencia absorbida de 10 CV, y para el bombeo de aceite también una bomba de marca Weatherford modelo 2WHT 53/F, con potencia de 10 CV. La Figura 10 muestra las dos bombas de aceite y agua utilizadas.

Aceite y agua son bombeados desde los tanques de almacenamiento, pasando por tuberías en PVC, hasta alcanzar la sección de pruebas.

### 5.1.2 Separador de aceite y agua.

Un separador de aceite y agua de placas coalescentes fue proyectado para optimizar el funcionamiento del sistema y separación de los líquidos. La capacidad del separador es de 2200 Litros. El revestimiento interno de las placas es hecho

Figura 9. Inversores de frecuencia.

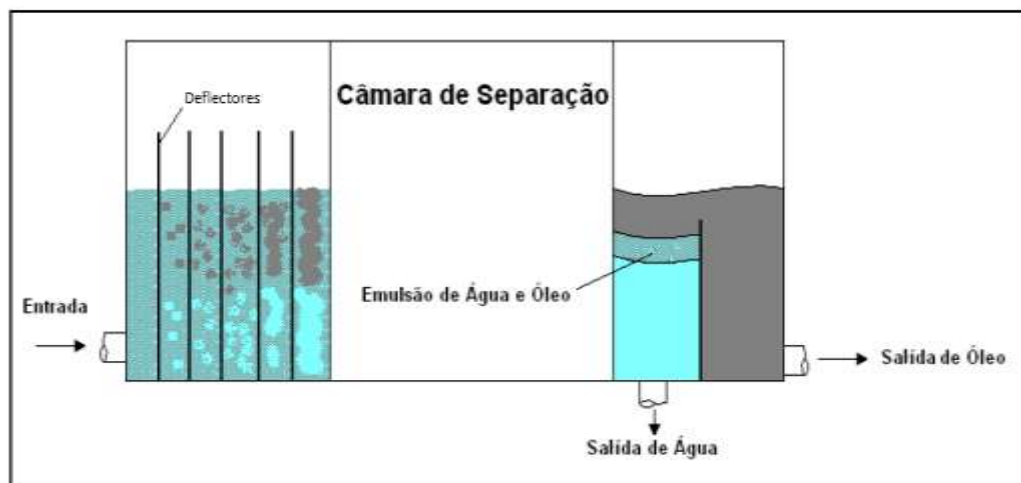


Figura 10. Bombas helicoidales de suministro de agua y aceite.



con una resina especial a base de poliéster para mejorar su afinidad con el agua y repulsión al aceite en una de las fases (fase hidrofílica y oleofóbica). El fenómeno recíproco debe ocurrir en la fase opuesta de la misma (fase hidrofóbica y oleofílica), está en PVC. Así, él puede operar con mezclas de aceite en agua y también con mezclas de agua en aceite. El separador está dividido en tres cámaras, como puede ser observado en el diagrama esquemático de la Figura 11. La primera, en la entrada, posee cuatro deflectores para regularizar el flujo de la mezcla antes de que llegue a las placas separadoras. En la segunda cámara, donde ocurre efectivamente la separación, se encuentran las placas corrugadas que realizan la separación de los fluidos. El principio de separación consiste en facilitar la aglutinación o coalescencia de las gotas de agua o aceite que se encuentran mezcladas en una dispersión homogénea, formando gotas cada vez mayores y aumentando así su velocidad de ascenso o descenso, conforme la ley de Stokes. Estas burbujas se separan naturalmente debido a la diferencia de densidad entre los fluidos. Por último, la tercera cámara sirve apenas para almacenar los volúmenes de agua y aceite, que regresan por gravedad hacia los respectivos tanques de almacenamiento. La Figura 12 muestra el separador de placas coalescentes.

Figura 11. Diagrama esquemático del separador de placas coalescentes.



Fuente: Rodríguez Iara.

Figura 12. a) Separador de agua y aceite del tipo placas coalescentes, b) Tanque de almacenamiento de almacenamiento



a)

b)

### 5.1.3 Medidores de Caudal.

Para la medición de caudal de agua fueron utilizados dos medidores. Para bajos caudales de agua, un medidor de engranajes modelo OGT  $1/2$ " Badgermeter con intervalo de medición de 1 a 35 l/min y precisión de +/- 0,75%. Para caudales altos, fue usado un medidor tipo vórtex, modelo EX-DELTA VXW1050 de la oval con un intervalo de medición de 16,6 a 1646 l/min y con una precisión de +/- 1%. El uso de cada medidor varió constantemente, pero el sensor que más se usó fue el modelo OGT Badgermeter debido a los patrones que se querían simular. En la Figura 13 a y b, se puede observar los medidores de agua de alto y bajo caudal, respectivamente.

Para la medición del caudal de aceite fueron usados tres medidores (Figura 14). Para caudal alto fue utilizado un medidor FLOWPET-EG LS5576-430A Oval, este medidor funciona por el principio de engranajes, o sea, es de desplazamiento positivo y tiene un intervalo de medición de 6,67 a 233,3 l/min y una precisión de

+/- 1%. Para caudal medio fue utilizado un medidor FLOWPET-EG LS5376-430A Oval con un intervalo de medición de 2,5 a 106,7 l/min y presión de +/- 1%.

Figura 13. Medidores de caudal del agua: a) Alto caudal; b) Bajo caudal.



a)

b)

Para medir el caudal bajo de aceite fue utilizado un medidor modelo LSF45L Oval M-III, con un intervalo de medición de 0,042 a 13,81 l/min con precisión de +/- 1%.

#### 5.1.4 Sección de pruebas.

La sección de pruebas es una tubería de acrílico de 12m de longitud dividida en 6 tubos de 2m, un diámetro interno de 26mm aproximadamente y un espesor de pared de 2,08mm. La unión entre los tubos fue hecha a través de piezas de PVC. Cada unión consiste de una pieza cilíndrica y dos bridas. Entre las uniones fueron colocados anillos de caucho (*o-rings*) para impedir fugas. Los tubos de acrílico fueron fijados sobre una estructura metálica inclinable (balancín) por medio de abrazaderas de aluminio. Además de las uniones, fueron colocadas otras piezas de PVC a lo largo de la línea para dar mayor soporte y estabilidad a la línea. Los detalles sobre las uniones y soportes en PVC pueden ser observados en la Figura 15. Las líneas de aceite y agua son tubos de PVC que interconectan los respectivos reservorios a la línea de pruebas.

Antes de dar inicio al proceso de instalación del mezclador, válvulas solenoides de cierre rápido fueron instaladas en el inicio y fin de la sección de pruebas. Después de las instalación de esas válvulas, un mezclador tipo “Y” de PVC fue montado de

Figura 14. Medidores de caudal del aceite: a) Bajo caudal; b) Medio caudal; c) Alto caudal.



a)



b)



c)

Figura 15. Soportes de los tubos y uniones utilizadas en la sección de pruebas.



Fuente: Rodríguez Iara.

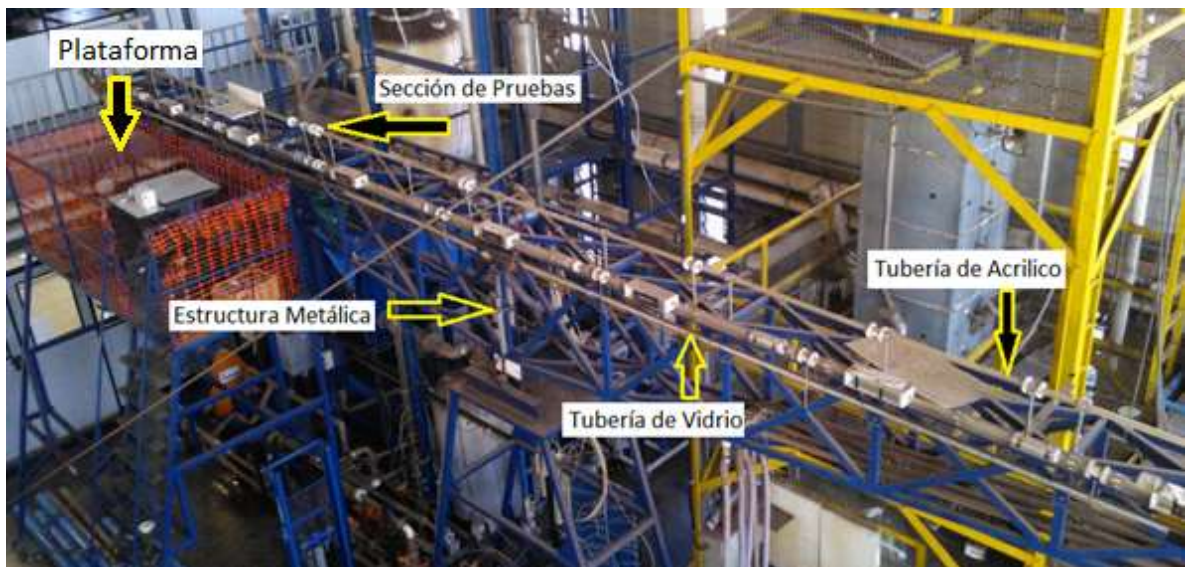
forma que la fase líquida menos densa (aceite) entre en la sección de pruebas por la parte superior y la fase líquida más densa (agua) entre por la parte inferior (Figura 16). En la Figura 17, se puede observar la sección de pruebas en acrílico, montada para el presente proyecto sobre la estructura metálica inclinable. En esa figura es posible observar también la línea de vidrio previamente existente.

Figura 16. Mezclador de aceite-agua tipo “Y”.



Fuente: Rodríguez Iara.

Figura 17. Tubería de acrílico y vidrio de 12m instaladas sobre la estructura metálica inclinable.



### 5.1.5 Sección de visualización y adquisición de datos.

El cálculo del diámetro de las gotas de aceite en agua en un flujo multifásico fue realizado a través de un video con una cámara de alta velocidad Olympus i-speed 3, donde fue diseñada una pieza de acrílico ajustada con bridas (Figura 18) por la estudiante de Doctorado de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos - USP Iara Hernández Rodríguez para obtener una mejor sección de visualización del flujo de aceite-agua, ya que el efecto de distorsión que produce la sección de la tubería afectaba la calidad del video e imagen.

Para la correcta medición del diámetro de las gotas de aceite en agua fue necesaria la calibración de la imagen obtenida por la cámara, corrigiendo efectos de paralaje y difusión de la luz. Así, un patrón cuadrículado de 0,2mm (Figura 19a), impreso en fotolitografía, fue fijado a una pieza de acrílico con una longitud ligeramente superior al diámetro interno del tubo (Figura 19b). Un bloque macizo de acrílico con un orificio de diámetro igual al diámetro interno de la tubería fue

Figura 18. Sección de visualización de acrílico: a) Bloque de acrílico diseñado, b) Montaje de la pieza en la tubería de pruebas.



a)



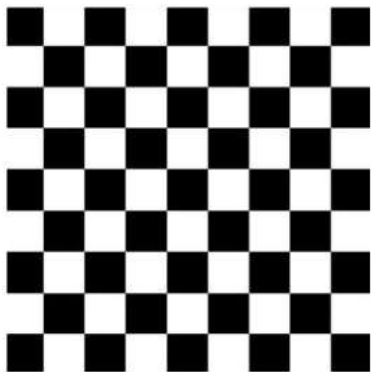
b)

utilizado para insertar el patrón en el tubo (Figura 19c), pequeñas aberturas fueron hechas en la parte superior e inferior del tubo para garantizar la fijación del patrón exactamente en el centro del tubo y perpendicular a la visión de la cámara. La Figura 20 presenta el bloque de acrílico con el patrón previamente insertado.

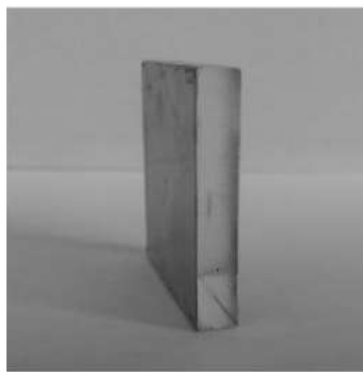
Otro bloque macizo de acrílico de dimensiones y características iguales a las del bloque que contienen el patrón fue utilizado como sección de visualización. Las dos piezas ya instaladas en la tubería pueden ser observadas en la Figura 18b. Es importante destacar en esa figura que la dirección del flujo es de la derecha hacia la izquierda.

Para realizar la segunda medición fue necesario diseñar otra pieza para colocar en contacto el sensor de medición de tamaño de partículas Sequip-ORM con el flujo multifásico, por tal razón el estudiante de Maestría de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos-USP Marcel Cavallini Barbosa diseñó una pieza de material PVC (Figura 21) para ensamblar en la tubería de pruebas y adicionalmente tuviera un orificio donde el sensor y el flujo de aceite-agua estuvieran en contacto para tomar

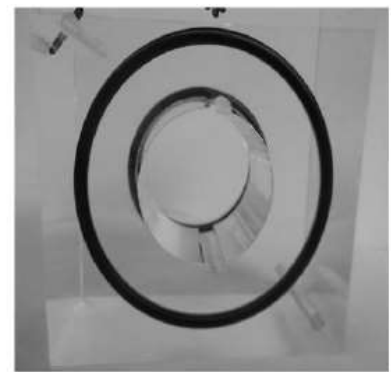
Figura 19. a) Patrón cuadrículado, b) Pieza de acrílico con el patrón, c) Pieza de acrílico mecanizada para insertar el patrón.



a)



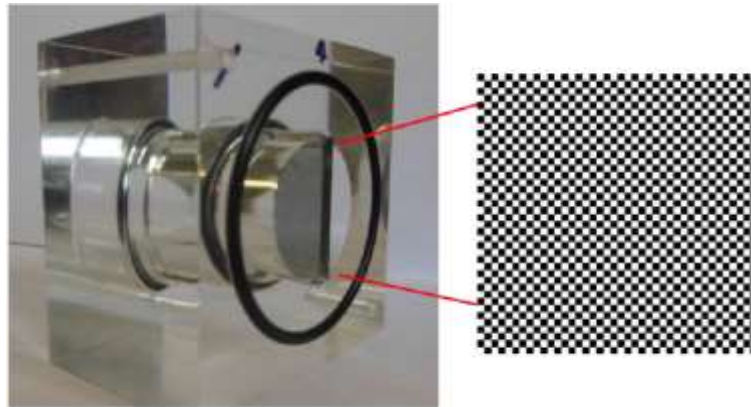
b)



c)

Fuente: Rodríguez Iara.

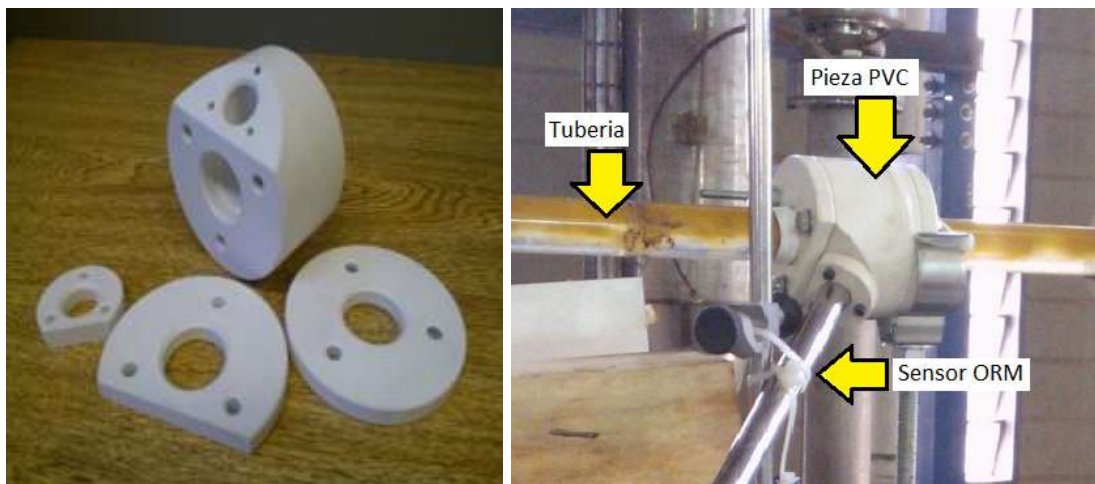
Figura 20. Bloque de acrílico con el patrón insertado.



Fuente: Rodríguez Iara.

la medidas de las gotas de aceite en agua. La pieza fue ensamblada por el estudiante de Doctorado de la EESC-USP Marlon Mauricio Hernandez Cely y el autor. Esta pieza contiene un orificio en su mitad con un diámetro igual al diámetro interno de la tubería, y fue ajustada a la tubería mediante el uso de bridas, adicionalmente se usaron sellos y empaques de caucho para evitar fugas.

Figura 21. Pieza diseñada para colocar en contacto el sensor ORM y el flujo multifásico en la tubería de pruebas.



### 5.1.6 Estación de control.

Un computador equipado con sistema de adquisición integra las señales medidas, tanto las señales de operación como de análisis, así como las señales de comando (inversores de frecuencia) vía protocolo TCP/IP. El sistema de adquisición y control utilizado en el presente trabajo es formado por una placa modelo NI PCI-6224 de la *National Instruments®* instalada en un computador y reconocida por la plataforma *Labview®* 8.6 (Figura 22). La placa de adquisición posee 16 bits de resolución, 48 canales digitales, 32 canales analógicos de tensión y capacidad para 250 mil muestras simultaneas por segundo. La gran mayoría de los sensores utilizados en los ensayos experimentales envía una señal de corriente que varía desde 4 a 20 mA. Para que las señales enviadas por los sensores sea reconocida por la placa de adquisición, se encuentra instalado en la entrada de la placa un bloque conversor con resistencias de precisión de 200 Ohms que convierte las señales de corrientes en señales de tensión.

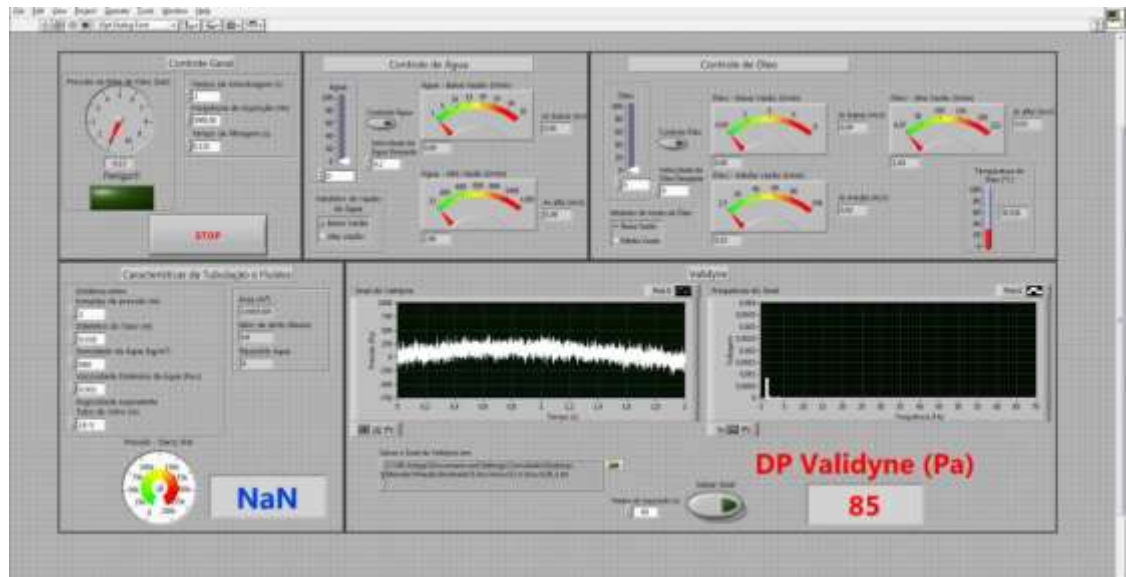
Figura 22. Computador para adquisición de señales y emisión de señales de comando.



Fuente: Rodríguez Iara.

Las interfaces A/D y de procesamiento de señales son compuestas por programas en plataforma LabVIEW®. Tales programas controlan la rotación de las bombas de desplazamiento positivo de agua y aceite y la abertura y cierre de válvulas neumáticas para el control de las líneas de aire, todo esto, via protocolo TCP/IP. Los mismos programas efectúan la lectura de diversos sensores, como presión absoluta (manómetros), medidores de presión diferencial, medidores de flujo para bajos y altos caudales de agua y aceite. La Figura 23 presenta la interface del programa utilizado para el control y adquisición de datos.

Figura 23. Interface del programa de adquisición y control en plataforma LabVIEW®.



### 5.1.7 Aparato de adquisición de imágenes.

La medición de las propiedades geométricas de las gotas, específicamente el diámetro de las gotas, fueron hechas con ayuda de videos tomados con una cámara de alta velocidad (tasa máxima de 33.000 cuadros por segundo) modelo i-speed 3 Olympus y el software de la cámara llamado i-speed Suite, la cámara fue utilizada a una tasa entre 500 y 1000 cuadros por segundo, según el tipo de

flujo multifásico y velocidades de los fluidos se seleccionó el número de cuadros por segundo, los videos tomados contienen una resolución máxima de 1280x1024 pixels, se usó un lente AF-S Nikkor para la cámara, con distancia focal de 60mm y abertura máxima de f/2,8D.

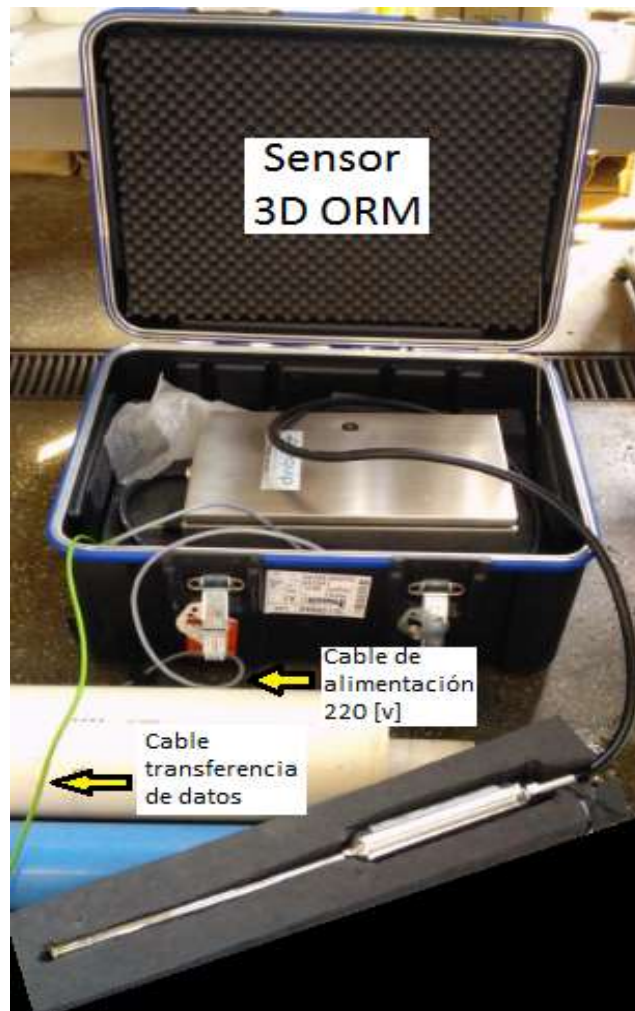
Figura 24. Cámara de alta Velocidad i-speed 3 Olympus.



Fuente: Google Imágenes.

La medición del diámetro y cantidad de gotas de aceite en agua fue realizada con la técnica del sensor medidor de tamaño de partículas Sequip-ORM, este sensor puede medir el diámetro y cantidad de partículas con geometría circular y tiene un rango de medición de 1 a 3000  $\mu\text{m}$ , el sensor contiene un láser con una potencia ajustable entre 1 y 5 mW, su temperatura estándar debe estar entre 5 y 85°C y una presión de hasta 6 bar, este sensor es hecho de acero inoxidable y el diámetro de la sección de medición del sensor que está en contacto con los fluidos es de 18mm.

Figura 25. Sensor medidor de tamaño de partículas Sequip-ORM.



## 5.2 Instalación Experimental Básica.

El desarrollo del procedimiento experimental básico fue realizado en el Laboratorio de Energía Térmica y Fluidos LETeF, donde el objetivo principal de estos experimentos fue verificar el estado y funcionamiento los equipos de medición, específicamente la cámara de alta velocidad y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM. La instalación se llevó a cabo principalmente con la realización de las muestras o fracciones de aceite-agua (Figura 26) que estaban contenidas en

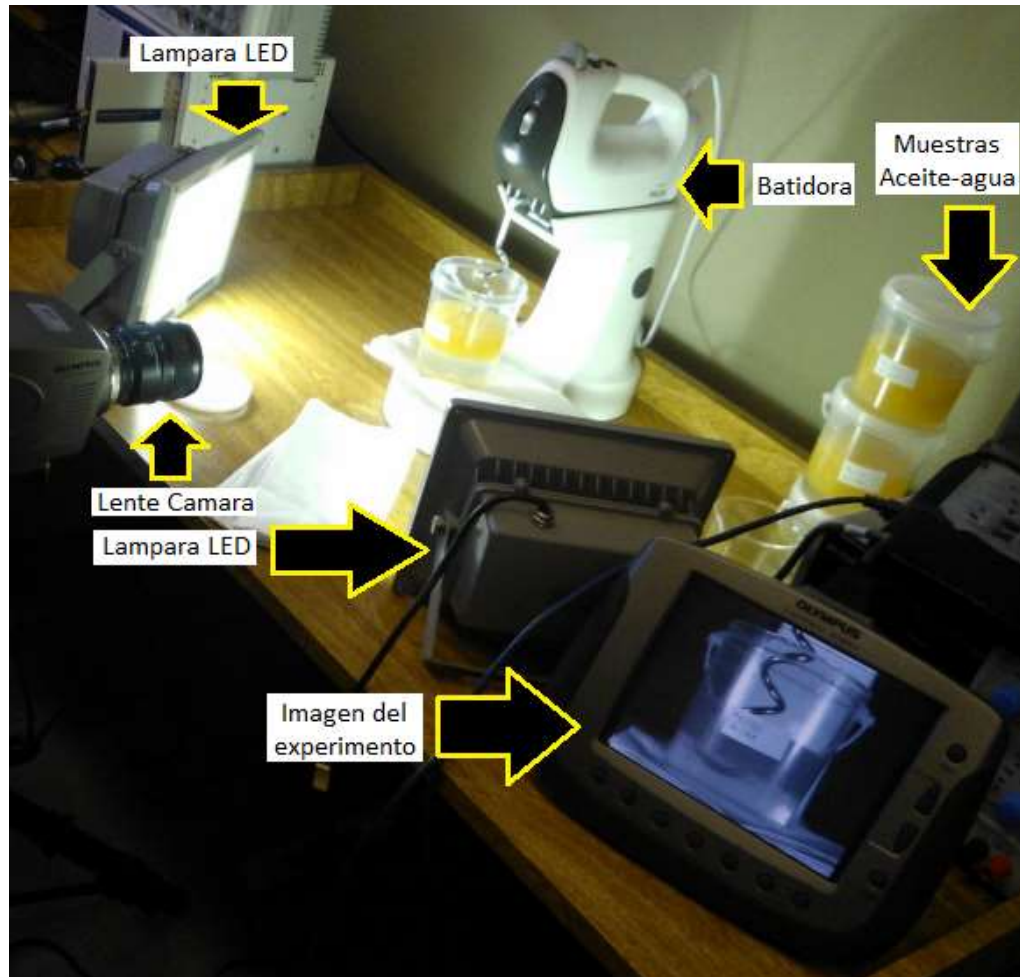
un Becker de plástico con sección transversal variable, estas muestras de aceite-agua fueron hechas por el estudiante de Doctorado de la EESC-USP Marlon Mauricio Hernández Cely y el autor. Para la realización de este experimento únicamente se usaron 3 muestras de aceite-agua.

Figura 26. Muestras de aceite-agua en Becker de plástico.



Una vez preparadas las muestras de aceite-agua, se realizó el montaje experimental. Este montaje fue realizado en un cuarto de pruebas que contiene el Laboratorio, todos los experimentos se llevaron a cabo sobre una mesa de madera y cerca a tomacorrientes de 110v y 220v para facilitar la alimentación eléctrica de los equipos de medición. Además de las muestras de aceite-agua, se usó una batidora marca Philips con potencia de 400W, frecuencia de 60Hz y voltaje de 127V y a una velocidad de 600 rev/min, la iluminación fue hecha por dos lámparas LEDs de alta capacidad (30W de potencia y 2300 lumen). Finalmente los instrumentos de medición utilizados para medir el tamaño de las gotas de aceite que se formaban al forzar la mezcla de aceite y agua con el uso de la batidora fueron la cámara de alta velocidad y el sensor ORM descritos en la sección 2.1.7.

Figura 27. Instrumentos del Montaje Experimental Básico.



### 5.3 Procedimiento Experimental.

A continuación se presentarán los procedimientos experimentales realizados para llevar a cabo este proyecto. Todos los experimentos fueron realizados en el laboratorio de Energía Térmica y Fluidos LETeF de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos, Universidad de Sao Paulo, Brasil. Adicionalmente los experimentos fueron realizados con el acompañamiento del estudiante de Doctorado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sao Paulo, Ingeniero Marlon Mauricio Hernández Cely y el autor, por otro lado, estos experimentos también fueron

realizados con la previa autorización del director del LETeF, ingeniero Oscar Mauricio Hernández Rodríguez..

### **5.3.1 Experimentos Básicos.**

El principal objetivo de los experimentos básicos fue verificar el estado y funcionamiento de los equipos de medición, específicamente la cámara de alta velocidad y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM, ya que estos instrumentos eran nuevos. La instalación del procedimiento experimental fue presentada en la sección 2.2, donde se muestran los equipos que fueron usados para realizar las mediciones. Estos experimentos fueron propuestos por la facilidad de ejecutarlos y por el bajo costo que generó realizarlos comparados con otros experimentos a mayor escala vistos en la literatura.

Además del experimento básico realizado con las fracciones de agua-aceite contenidas en un Becker de plástico, se realizaron otras pruebas básicas para verificar el funcionamiento del sensor medidor de tamaño de partículas ORM. La primera de ellas se llevó a cabo suministrando con agua un acuario de vidrio (Figura 28), una vez el acuario fue abastecido con suficiente agua, se introdujo un pequeño tubo de plástico el cual conducía aire a presión, este aire a presión dentro del agua generaba gotas y burbujas de agua que posteriormente se medirían sus tamaños con ayuda del sensor ORM.

Figura 28. Experimento Básico 1 usando el sensor medidor de tamaño de partículas ORM.

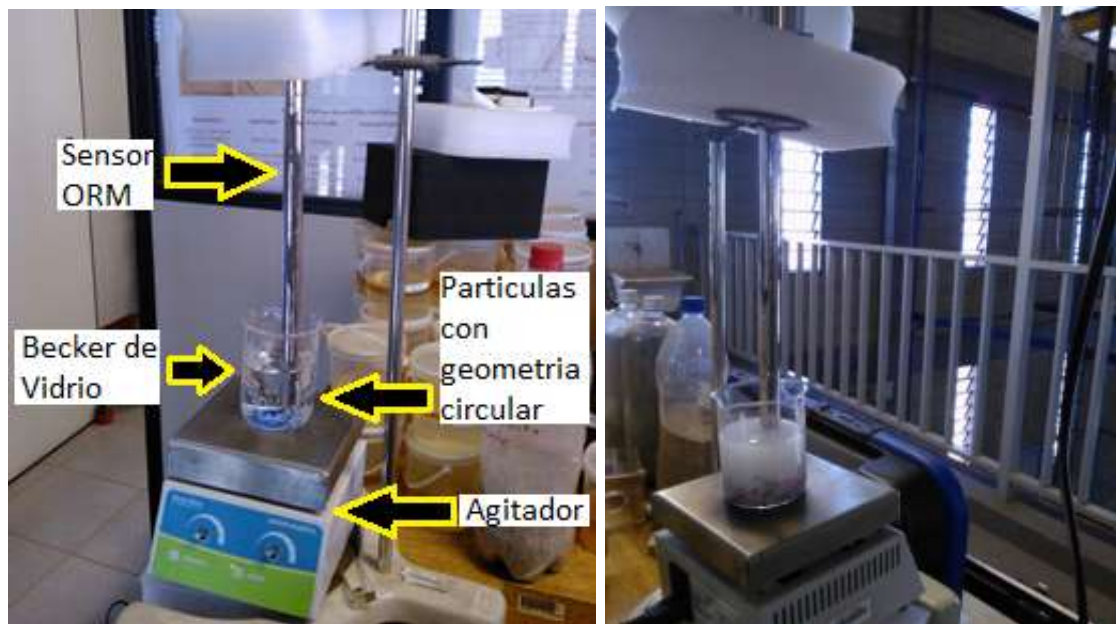


Los resultados obtenidos con el software del sensor fueron satisfactorios, ya que el sensor consiguió medir el diámetro de las gotas y burbujas generadas en el agua, pero estos valores no eran confiables ni garantizados, ya que los tamaños de las gotas y las burbujas variaban mucho visualmente, por tal razón se necesita medir los tamaños de las gotas y burbujas con otro instrumento de medición o medir los tamaños de las partículas con geometría circular manualmente antes de ser introducidas en el agua, por tal razón, se tomó la decisión de usar esferas de plástico para medir sus tamaños antes de introducirlas al agua y posteriormente comparar esos valores medidos manualmente con los valores medidos por el sensor ORM.

El segundo experimento básico (Figura 29) contó con un Becker de vidrio con capacidad máxima de 250ml, un agitador electro-mecánico, un electroimán, el sensor ORM y pequeñas partículas de plástico con geometría circular y diámetro menor a 3mm. El experimento consistía en colocar encima del agitador el Becker de vidrio lleno con agua y con las partículas de plástico dentro del agua,

posteriormente se encendía el agitador, este agitador contenía un motor eléctrico internamente que giraba a una velocidad variable; una vez el agitador era encendido se introducía una electroimán al Becker de vidrio y mediante electromagnetismo el electroimán comenzaba a girar haciendo la función de un mezclador; la velocidad a la que giraba el electroimán dependía de la velocidad a la que giraba el motor del agitador, esta velocidad se manipulaba manualmente mediante selectores.

Figura 29. Experimento Básico 2 usando el sensor medidor de tamaño de partículas ORM.



Los resultados obtenidos en el experimento básico 2 fueron los esperados por los autores, aunque no en su totalidad, ya que el sensor pudo medir el tamaño de las partículas de plástico con geometría circular y los valores medidos por el sensor eran muy cercanos a los valores medidos manualmente por los autores, la diferencia de valores era de micras, sin embargo uno de los problemas que fue percibido, es que el sensor puede medir partículas con diámetro cercano a 3mm

pero tiene dificultad para detectarlas, es decir, el identificaba pocas partículas con ese diámetro y en un intervalo de tiempo variable; el sensor siempre mostró preferencia para medir partículas menores a 200  $\mu\text{m}$ , las cuales en su mayoría pueden ser partículas invasoras y/o suciedad del agua.

El tercer experimento básico (Figura 30) también fue ejecutado con éxito, tanto las medidas obtenidas por el sensor ORM como los videos tomados y cálculo del diámetro de las gotas de aceite y agua con ayuda de la cámara de alta velocidad y del software i-speed suite. El experimento contó con los instrumentos mencionados en la sección 2.2. Una vez que se determinaron las medidas finales que se obtuvieron con cada equipo de medición se llevó a cabo una comparación para verificar la viabilidad de usar estas técnicas de medición, estos valores experimentales serán presentados en la sección 3 de resultados experimentales. De igual forma se concluye que las técnicas de medición son confiables pero se deberán realizar unas ayudas adicionales en los experimentos principales para obtener una medición y visibilidad más certera, como un patrón guía de medición como el presentado en la sección 2.1.5 para filmar el video con la cámara de alta velocidad. El experimento se realizó al colocar la batidora sobre una mesa fija, esta batidora tenía una hélice en forma espiral que entraría en contacto directo y formaría un flujo forzado entre el agua y aceite que estaban contenidos en un Becker de plástico. Una vez el flujo de aceite-agua se estabilizó se llevó a cabo la medición del tamaño de las gotas que se formaron.

Figura 30. Experimento Básico 3 usando la cámara de alta velocidad.

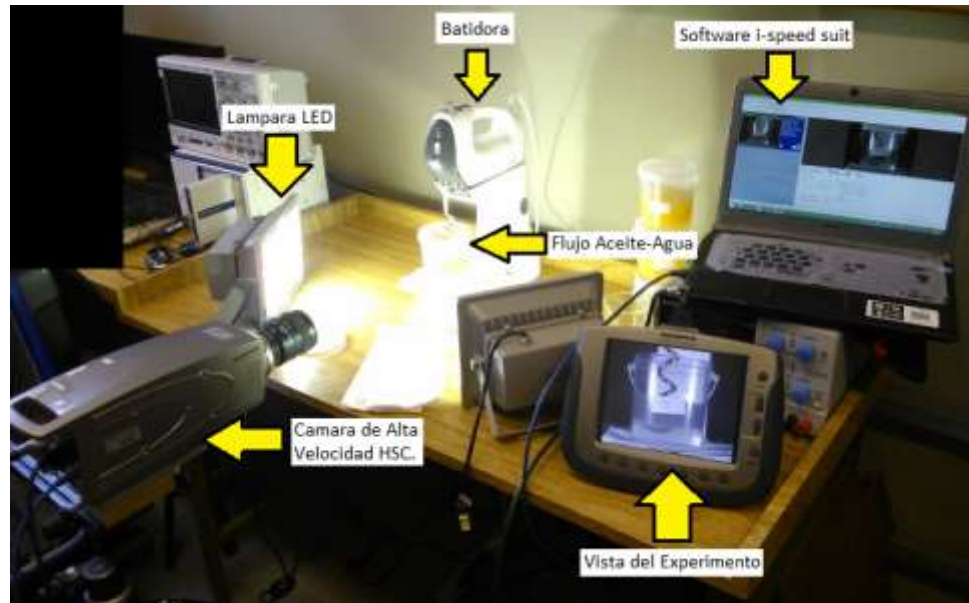
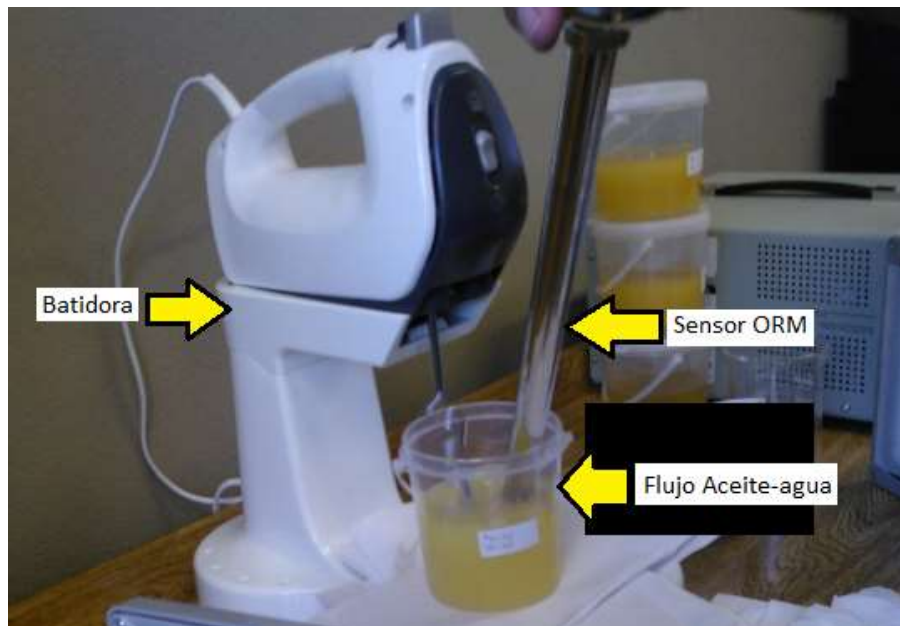


Figura 31. Experimento Básico 3 usando el sensor ORM.



La batidora usada tenía la capacidad de girar a 5 velocidades diferentes, las revoluciones de cada velocidad fueron medidas con un tacómetro marca minipa MDT 2238 (Figura 32) y fueron las siguientes: 1- 591 rev/min, 2- 693 rev/min, 3- 810 rev/min, 4- 902 rev/min y 5- 993 rev/min, inicialmente se usaba la velocidad 1 y se iba aumentando consecutivamente hasta llegar a la velocidad máxima, una vez que el flujo se estabilizaba se llevaba a cabo la medición de las gotas usando la velocidad 2 de 693 rev/min.

Figura 32. Tacómetro minipa MDT 2238.

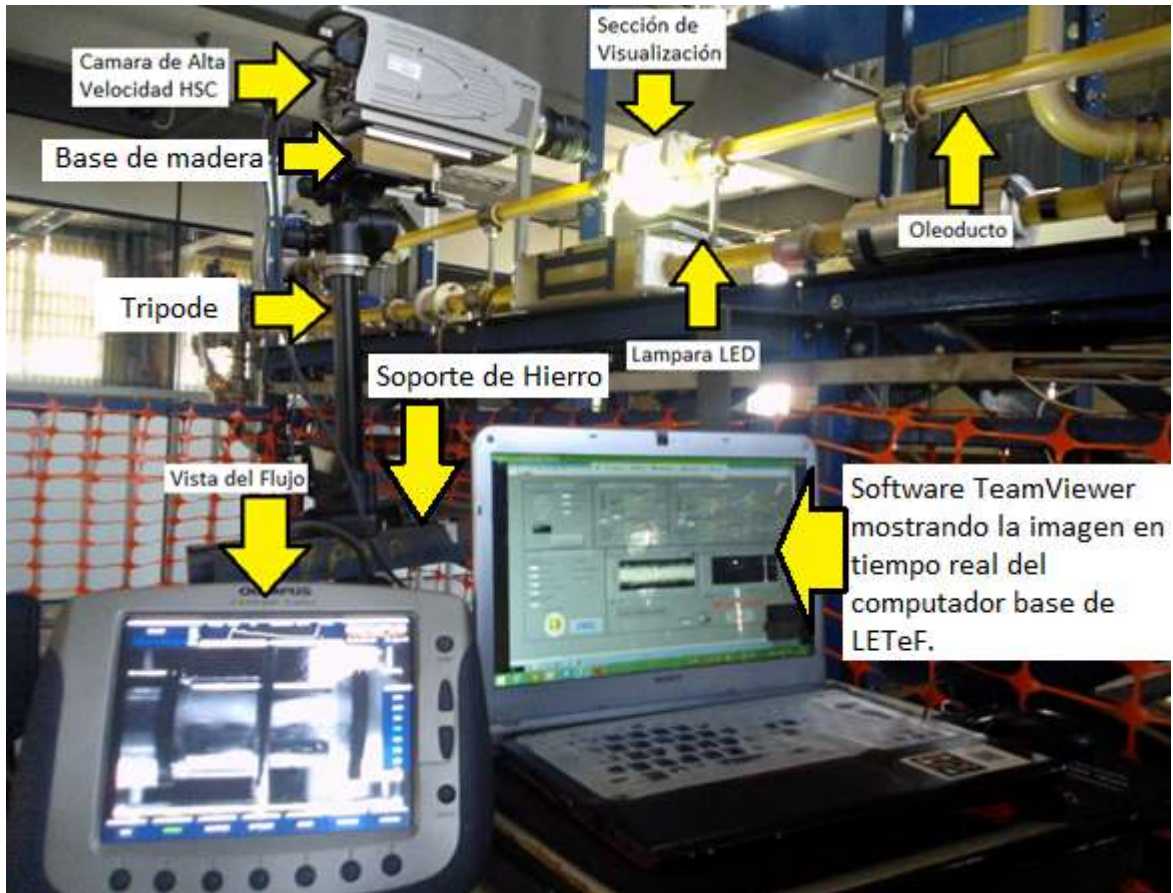


### 5.3.2 Experimento Principal.

Este experimento principal se llevó a cabo en el oleoducto piloto de LETeF (Figura 7), la instalación y procedimiento experimental fue presentado en la sección 2.1. El montaje de los equipos de medición y el control del oleoducto fue realizado sobre una plataforma ubicada al frente del oleoducto, donde los investigadores realizaron el montaje de los equipos manualmente sobre la plataforma de forma

estratégica para tomar los videos con la cámara de alta velocidad y ubicando fijamente el sensor ORM entre el oleoducto y la plataforma.

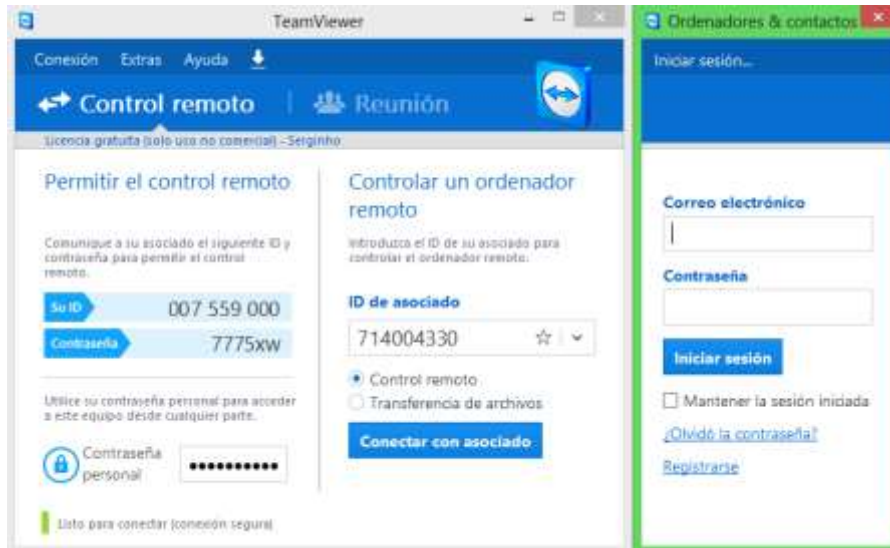
Figura 33. Experimento principal usando la cámara de alta velocidad.



Primero se realizaron la toma de los videos con la cámara de alta velocidad (Figura 33), el lente de la cámara de alta velocidad (ver sección 2.1.7) fue ubicado a 20 centímetros de distancia respecto a la sección de visualización de acrílico (Figura 18), esta distancia fue escogida aleatoriamente luego de varias pruebas de visualización, donde se concluyó que esa era la mejor distancia para tomar los videos. El montaje de la cámara fue realizado principalmente con el diseño de un soporte de hierro que sería atornillado entre la estructura del oleoducto y la

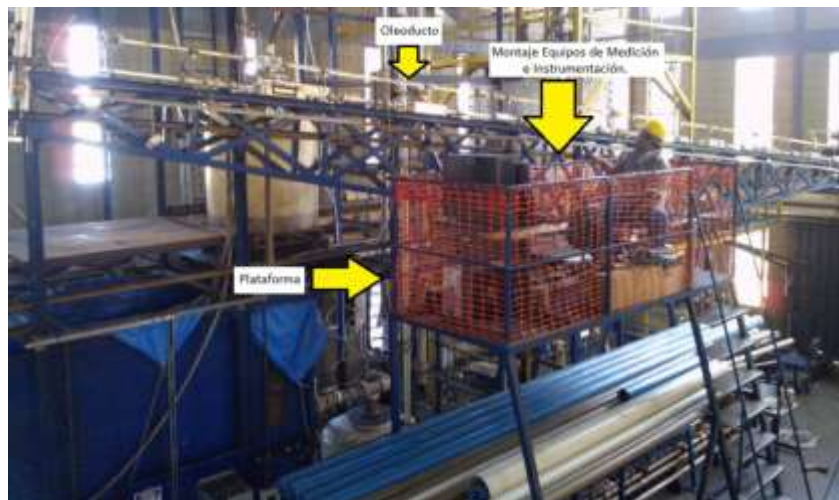
plataforma, una vez se garantizaba la fijación del soporte de hierro a la estructura se ensamblaba un trípode a la base del soporte de hierro, este trípode tenía atornillado en su parte superior una base de madera, esta base de madera fue diseñada para garantizar la estabilidad y fijación de la cámara, la base de madera y la cámara se ensamblaban mediante un tornillo apretado manualmente; los diseños para el montaje de la cámara fueron hechos por la estudiante de Doctorado Iara Hernández Rodríguez. Después del montaje de la cámara se ubicaron las lámparas LEDs, una se ubicó debajo de la sección de visualización, mientras la segunda lámpara en la parte trasera de la sección de visualización, tanto la cámara de alta velocidad como las lámparas LEDs necesitaron una fuente de alimentación de 110v. Posteriormente se conectó la unidad de visualización y control CDU de la cámara de alta velocidad y un computador portátil marca Sony Vaio, en este computador fue instalado un software gratuito llamado TeamViewer 9 (Figura 34), con este software los investigadores lograron conectarse desde el computador portátil Sony Vaio ubicado en la plataforma con el computador base del laboratorio (Figura 22) que controlaba la instrumentación del oleoducto, es decir, en la pantalla del computador Sony Vaio se puede ver y controlar en tiempo real el sistema operativo del computador base del laboratorio, por tal razón el control total del oleoducto se realizó desde la plataforma, por otro lado el control del oleoducto se realizaba mediante el uso del software Labview presentado en la sección 2.1.6 que estaba instalado en el computador base del laboratorio. Esta decisión fue tomada debido a que el computador base del laboratorio estaba ubicado en el primer piso del laboratorio y por motivos de seguridad para el control del oleoducto junto con los instrumentos de medición debía hacerse desde la plataforma.

Figura 34. Interface de conexión Software TeamViewer 9.



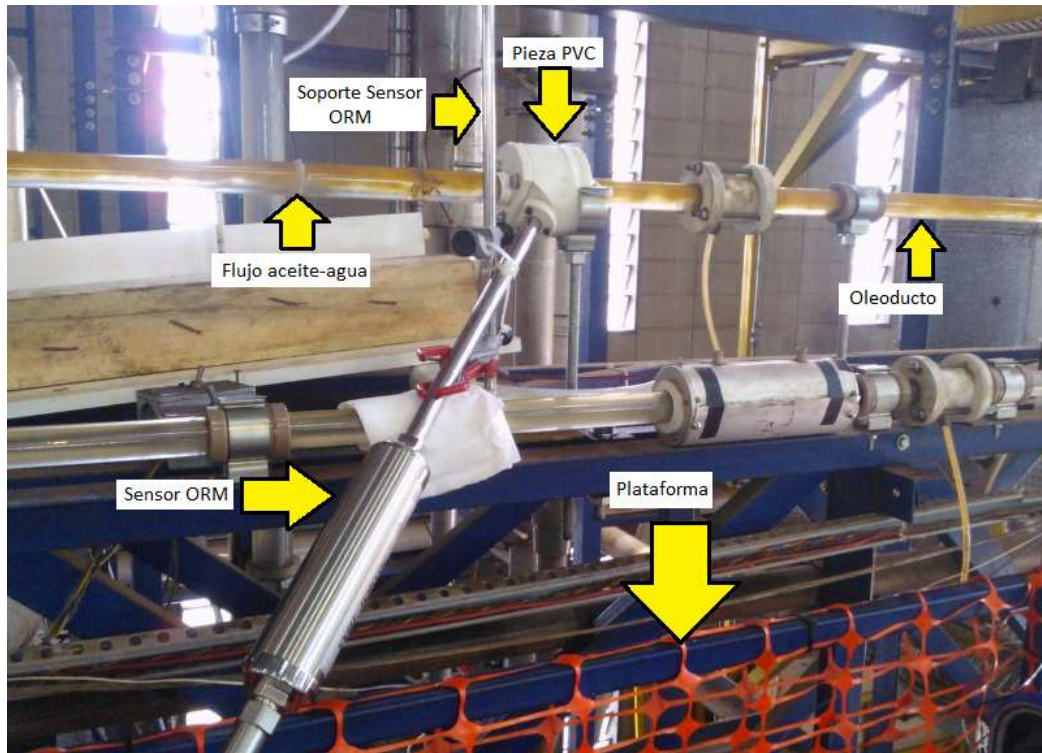
Una vez se garantizaba el montaje total de la instrumentación, se procedía a dar una inspección visual al oleoducto para verificar que las válvulas estuvieran en la posición correcta y las tuberías libres de fugas.

Figura 35. Vista del oleoducto y plataforma.



El experimento iniciaba al energizar las bombas de desplazamiento positivo de agua y aceite (Figura 10), encendiendo los inversores de frecuencia (Figura 9) y todos los sensores del oleoducto; posteriormente se daba inicio al funcionamiento de la bomba de agua y seguidamente a la bomba de aceite y así comenzar el flujo de los fluidos por las tuberías, el control de las bombas y todo el sistema del oleoducto se llevó a cabo desde la parte superior de la plataforma y el uso del computador Sony Vaio. El primer flujo multifásico aceite-agua simulado fue el estratificado con mistura en la interface, las velocidades de agua y aceite utilizadas para generar el tipo de flujo fueron obtenidas del trabajo de investigación realizado por el Doctor en Ingeniería Mecánica Marcelo Souza de Castro, Souza de Castro realizó 338 pruebas en el oleoducto del LETeF y creó una tabla de los patrones de flujo que se pueden simular en el oleoducto del LETeF (Anexo A). Las velocidades superficiales utilizadas para este proyecto fueron: Primero 0,1(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua, segundo 0,12(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua, tercero 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua, los tres flujos multifásicos simulados corresponden al flujo multifásico estratificado con mistura en la interface. Finalmente cuando se alcanzaban las velocidades superficiales solicitadas en el sistema y visualmente se veía la transferencia de gotas de aceite al agua, se encendían las lámparas LEDs, la cámara de alta velocidad y se procedía a filmar el video. Los videos fueron grabados por dos personas, mientras el estudiante de Doctorado Marlon Hernández controlaba el software y video de la cámara, el autor realizaba la inspección de los instrumentos y el oleoducto para verificar su buen funcionamiento durante la grabación. De la misma forma fue realizado el video para el flujo multifásico aceite-agua anular, pero la diferencia fue el número de velocidades usadas que fue solo una: 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua. Los fluidos utilizados fueron: aceite mineral con una viscosidad aproximada de 300 cP a 25°C y densidad aproximada de 880 Kg/m<sup>3</sup>, y el agua con una viscosidad de 1 cP y densidad aproximada de 1000 Kg/m<sup>3</sup>.

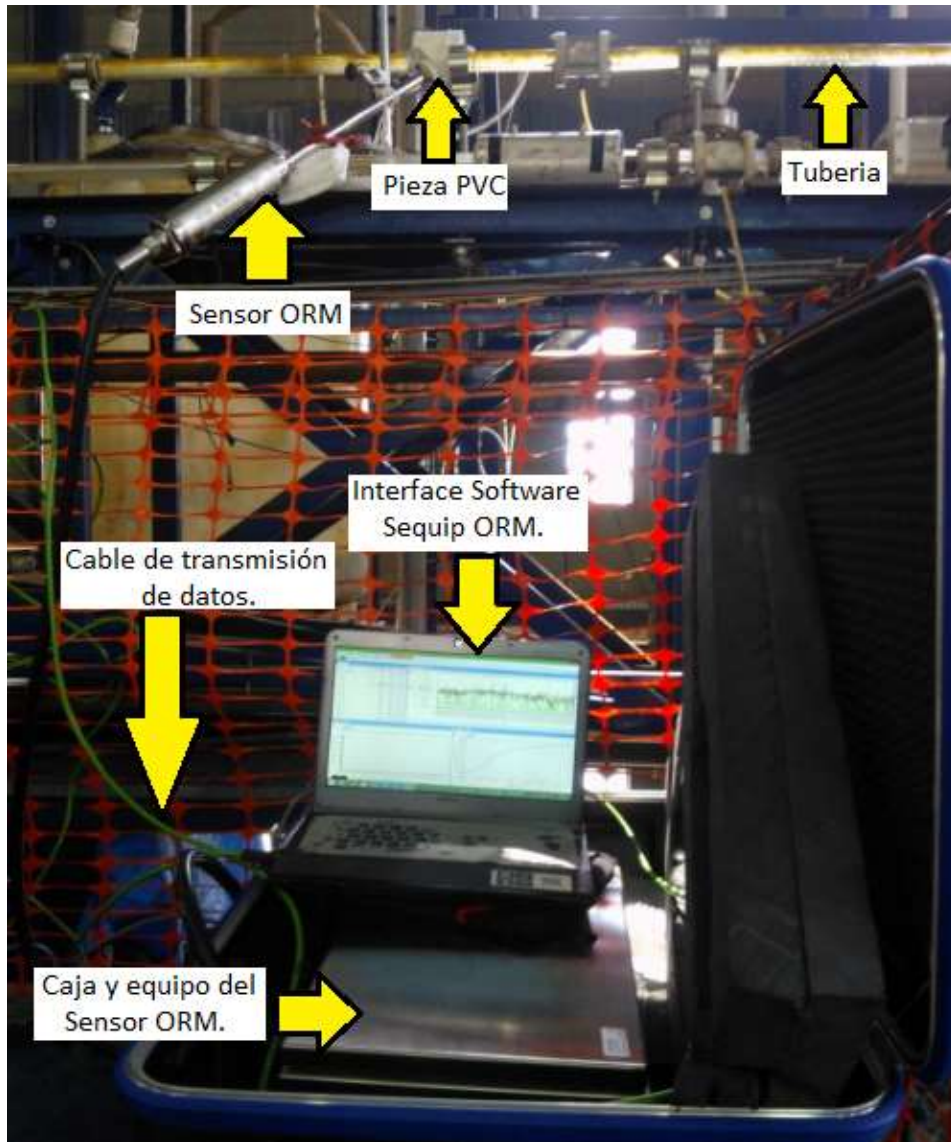
Figura 36. Experimento principal usando el Sensor ORM.



El segundo experimento principal (Figura 36) contó primero con el montaje de una pieza hecha en PVC (Figura 21) diseñada específicamente para garantizar el contacto directo entre el sensor ORM y el flujo multifásico aceite-agua. El montaje de la pieza se realizó de forma manual y fue realizado por los investigadores. Primero se llevó a cabo el desmontaje, corte y limpieza de una sección de la tubería, posteriormente se limpió la pieza de PVC y se realizó el montaje entre la parte interior de la pieza de PVC y la parte exterior de la tubería de acrílico, la pieza de PVC estaba constituida por 3 partes, una principal y dos tapas en cada lado que fueron unidas por medio de tornillos en forma de brida; para evitar fugas de los fluidos fueron adaptados dos anillos de caucho (sellos) entre la unión de la pieza de PVC y la tubería, estos anillos tenían un diámetro interno igual al diámetro exterior de la tubería, adicionalmente también se usó esparadrapo alrededor de la tubería. Una vez se garantizaba el montaje de la pieza de PVC en

el oleoducto se procedía a introducir el sensor ORM por un agujero de la pieza principal de PVC, para evitar fugas en la unión entre el sensor y la pieza se usó un anillo de caucho con diámetro interno igual al diámetro externo del sensor y esparadrapo alrededor del sensor; la unión (además del agujero) entre el sensor y la pieza principal de PVC se ajustaba por medio de una de las partes que componen la pieza de PVC (anillo de PVC), este anillo tenía un agujero con diámetro interno igual al diámetro externo del sensor, por tal razón primero se introducía el anillo al sensor y posteriormente se unía a la pieza principal de PVC por medio de tornillos. Para energizar el sensor ORM se necesitó de una conexión a 220v. La transmisión de los datos entre el sensor ORM y el computador Sony Vaio se realizaba por medio un cable de datos en tiempo real (Figura 37). El software utilizado para medir y almacenar los datos fue Sequip ORM que fue previamente instalado. Las velocidades superficiales utilizadas fueron las mismas al experimento principal usando la cámara de alta velocidad.

Figura 37. Experimento principal 2 usando el Sensor ORM.



## **6. RESULTADOS EXPERIMENTALES.**

En esta sección serán presentados los resultados experimentales del tamaño de las gotas de aceite que se transfieren al agua en dos tipos de flujo multifásico obtenidos en las pruebas realizadas en el oleoducto piloto del LETeF con el uso de las técnicas de medición cámara de alta velocidad y sensor medidor de tamaño de partículas ORM. Primero se mostrará la interface y opciones básicas de los programas (Software) utilizados para la obtención, procesamiento y publicación de los resultados finales medidos y calculados, posteriormente se mostrarán los resultados finales.

### **6.1 Resultados Experimentos Básicos.**

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos después de la realización de los experimentos básicos con el uso de las técnicas de medición cámara de alta velocidad y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM.

#### **6.1.1 Resultados Experimentos Básicos con el uso de la cámara de alta velocidad.**

El procedimiento para calcular el diámetro de las gotas que se formaron en estos experimentos con el uso de la técnica de medición cámara de alta velocidad y su software i-speed Suite es presentado en el anexo H. En este experimento básico fue adaptado un flujo multifásico aceite-agua en un Becker de plástico presentado en la sección 2.3.1. El experimento fue realizado para 3 diferentes fracciones de aceite-agua que fueron: agua 0.5 – aceite 0.5, agua 0.3 – aceite 0.7, agua 0.15 – aceite 0,85.

En la Figura 38 que fue tomada durante la realización del experimento se puede ver el Becker de plástico que contiene una fracción de agua 0.3 y aceite 0.7, además se observa la reflexión que genera el material (plástico) del Becker con las luces de las lámparas LEDs, también se observa la hélice en forma de espiral que fue utilizada para forzar el flujo de aceite y agua, por otro lado se puede mirar

la formación de gotas en el flujo, que debido a la geometría del Becker las gotas tienden a tener una forma similar a los cráteres de la luna.

Figura 38. Experimento básico con una fracción de agua 0.3 – aceite 0.7.



Después de realizar los respectivos experimentos y calcular el diámetro de las gotas que se formaron en el flujo con la ayuda del software i-speed Suite, los diámetros de las gotas calculados son completamente variables y además prácticamente los mismos en los 3 experimentos básicos, los valores pueden oscilar entre  $600\mu\text{m}$  y  $1500\mu\text{m}$ .

En la Figura 39 se tienen 2 imágenes del cálculo de los diámetros de las gotas con el uso del software i-speed suite, las imágenes corresponden a una fracción de agua 0.15 y aceite 0.85. En las imágenes se pueden ver los diferentes tamaños de las gotas y el diámetro de algunas de ellas, por ejemplo en la imagen izquierda se tienen diámetros de  $753\mu\text{m}$ ,  $868\mu\text{m}$ ,  $1121\mu\text{m}$  y en la imagen derecha  $622\mu\text{m}$ ,

1054  $\mu\text{m}$ . Uno de los problemas que presentó el software fue el cálculo de las gotas menores a 600 $\mu\text{m}$ , ya que al acercar la imagen se distorsionaban las gotas pequeñas dificultando su cálculo y su visualización, por tal razón en la imágenes solo se muestra gotas con tamaños de 600 $\mu\text{m}$ , pero en el flujo si hay gotas menores a este tamaño.

Figura 39. Cálculo del diámetro de las gotas con el uso de la HSC.

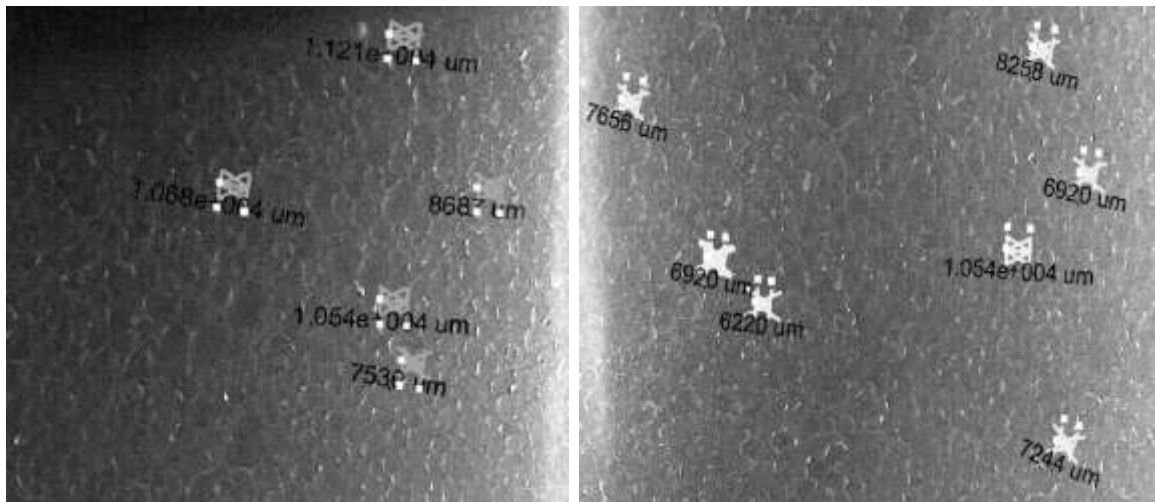
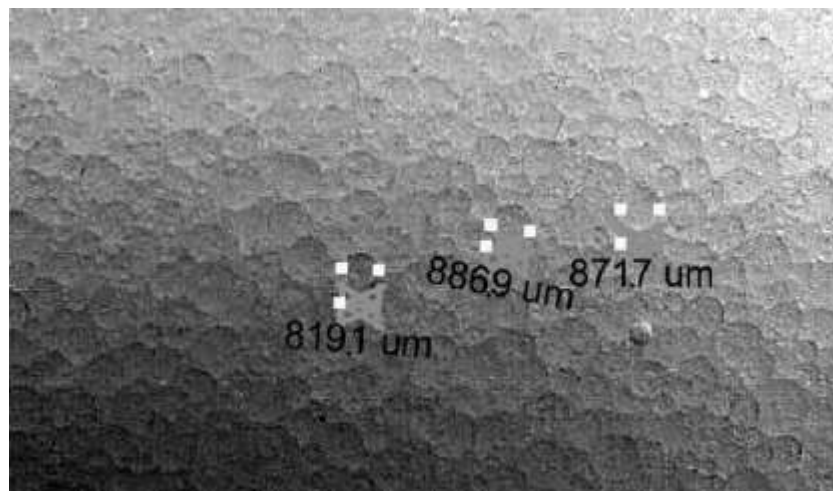


Figura 40. Cálculo del diámetro de las gotas con fracción de agua 0.5 y aceite 0.5.



En la Figura 40 se puede ver una de las imágenes que se utilizó para el cálculo del diámetro de las gotas para una fracción de agua 0.5 y aceite 0.5, en esta imagen se obtuvieron diámetros cercanos a  $800\mu\text{m}$ , por otro lado se ve que las gotas tienen forma de cráter como los de la luna y con tamaños variables.

Finalmente se puede concluir que la técnica de medición para el cálculo de diámetros de gotas con el uso de la cámara de alta velocidad Olympus i-speed 3 funciona, pero tiene algunas limitaciones para medir tamaños menores a  $600\mu\text{m}$  debido a la distorsión que presenta la imagen al acercarla, sin embargo, se calcularon tamaños de gotas entre  $600\mu\text{m}$  y  $1500\mu\text{m}$  para los 3 experimentos. Por otro lado, en la siguiente sección se mostrarán los resultados obtenidos con el uso del sensor medidor ORM, para posteriormente compararlos con los diámetros calculados con la cámara de alta velocidad.

### **6.1.2 Resultados Experimentos Básicos con el uso del sensor medidor de tamaño de partículas ORM.**

El procedimiento para medir el diámetro y cantidad de gotas que se formaron en estos experimentos con el uso del sensor medidor de tamaño de partículas ORM y su software MCSA Sequip-WinORM es presentado en el anexo H. En este experimento básico fue adaptado un flujo multifásico aceite-agua en un Becker de plástico presentado en la sección 2.3.1. El experimento fue realizado para 3 diferentes fracciones de aceite-agua que fueron: agua 0.5 – aceite 0.5, agua 0.3 – aceite 0.7, agua 0.15 – aceite 0,85.

El software MCSA Sequip-WinORM ofrece la opción de medir las gotas en un intervalo de  $1\mu\text{m}$  a  $3000\mu\text{m}$ , pero después de realizar el primer experimento básico usando la cámara de alta velocidad se decidió usar hipotéticamente un intervalo entre  $200\mu\text{m}$  y  $3000\mu\text{m}$ , es decir se supone que las gotas medidas por el sensor ORM menores a  $200\mu\text{m}$  son impurezas o partículas invasoras.

A continuación se mostrarán las gráficas completas de los valores calculados por el sensor en gráficos generados en Microsoft Excel. El tiempo de medición de cada experimento fue aproximadamente 1 minuto, adicionalmente, si el lector desea ver los resultados con más detalle, puede revisar los anexos J, K L.

1- Para una fracción de agua 0,5 y aceite 0,5 los valores medidos por el sensor ORM son presentados desde la figura 41 a la 44.

Figura 41. Gráfica 1 Número de gotas experimento básico 1.

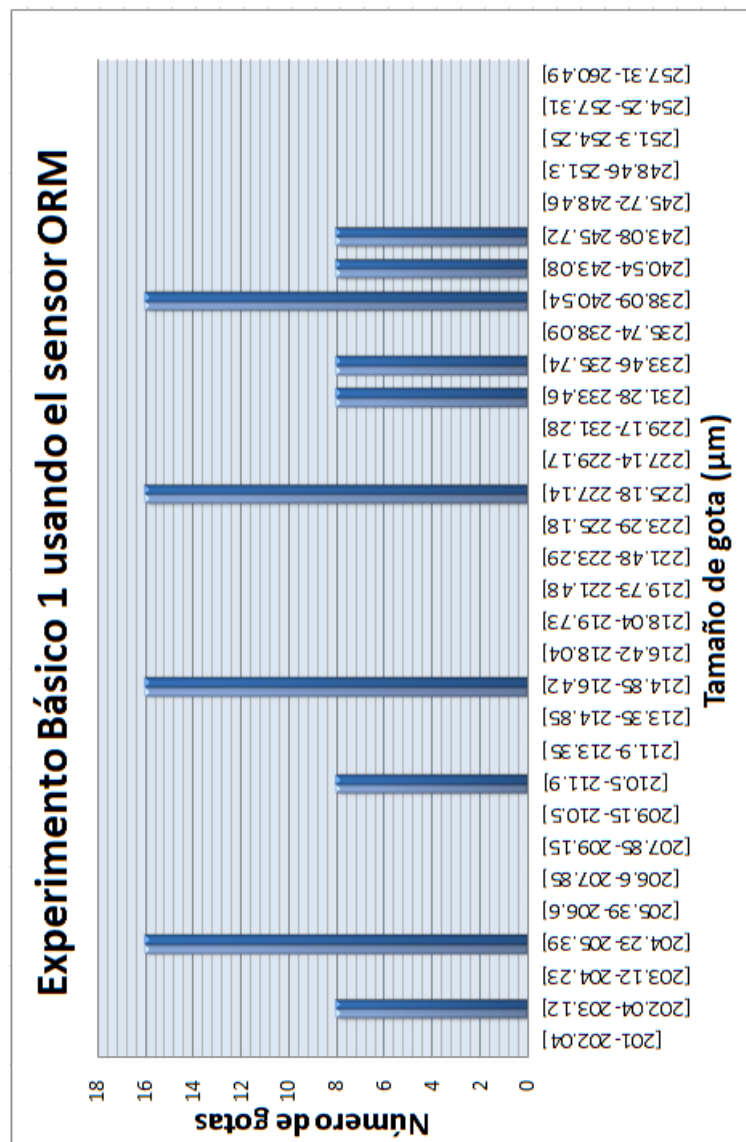


Figura 42. Gráfica 2 Número de gotas experimento básico 1.

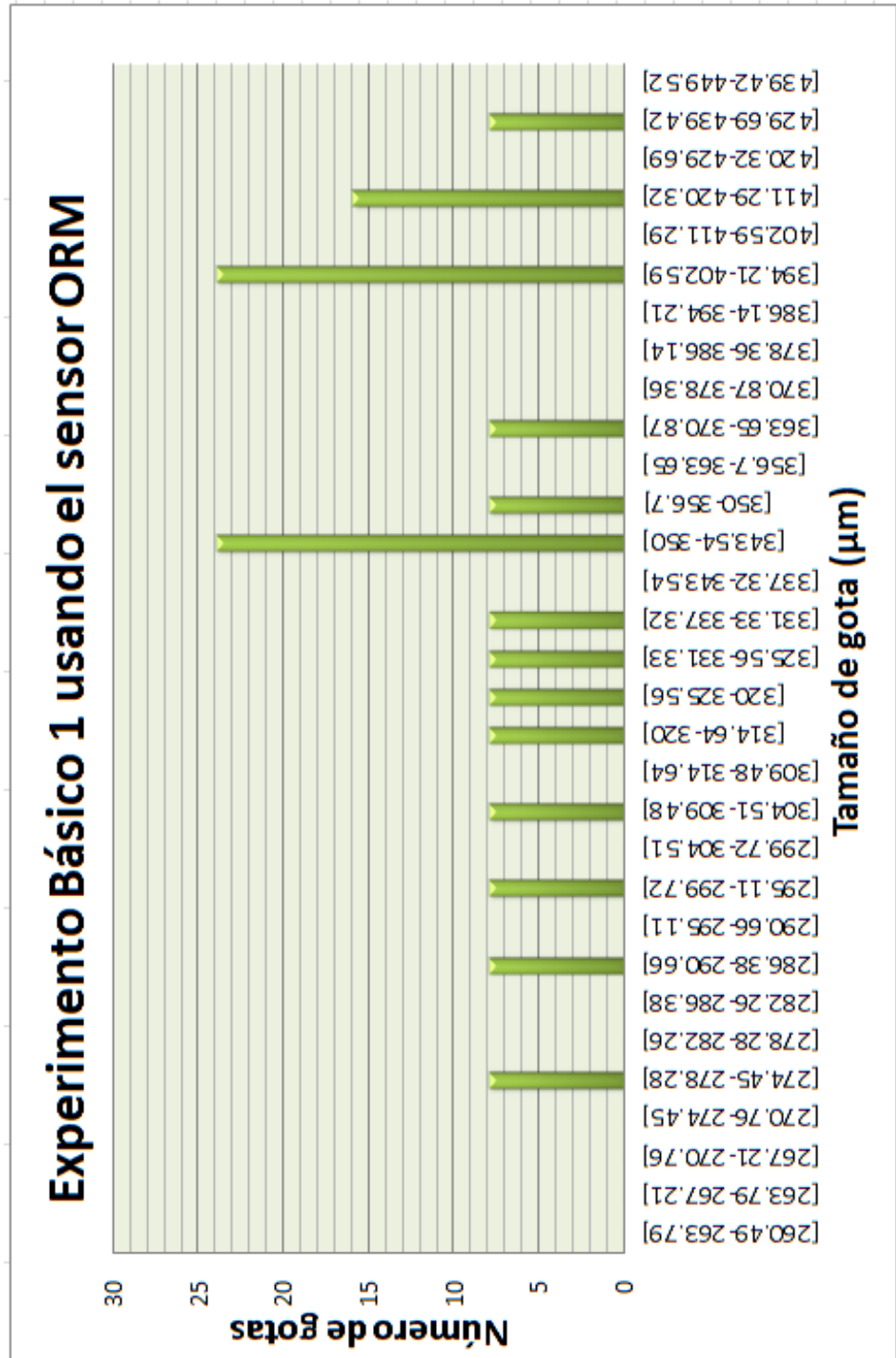


Figura 43. Gráfica 3 Número de gotas experimento básico 1.

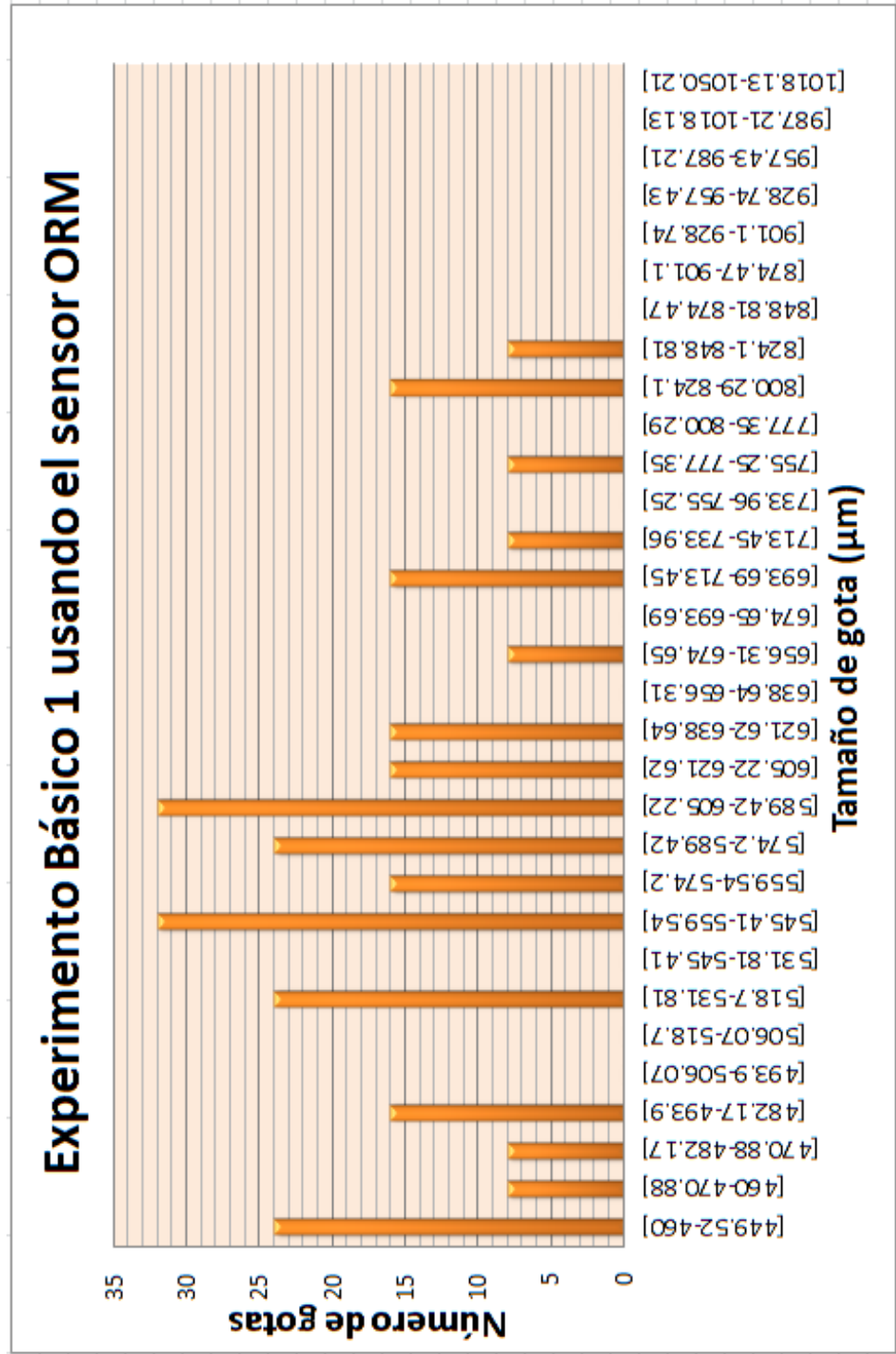
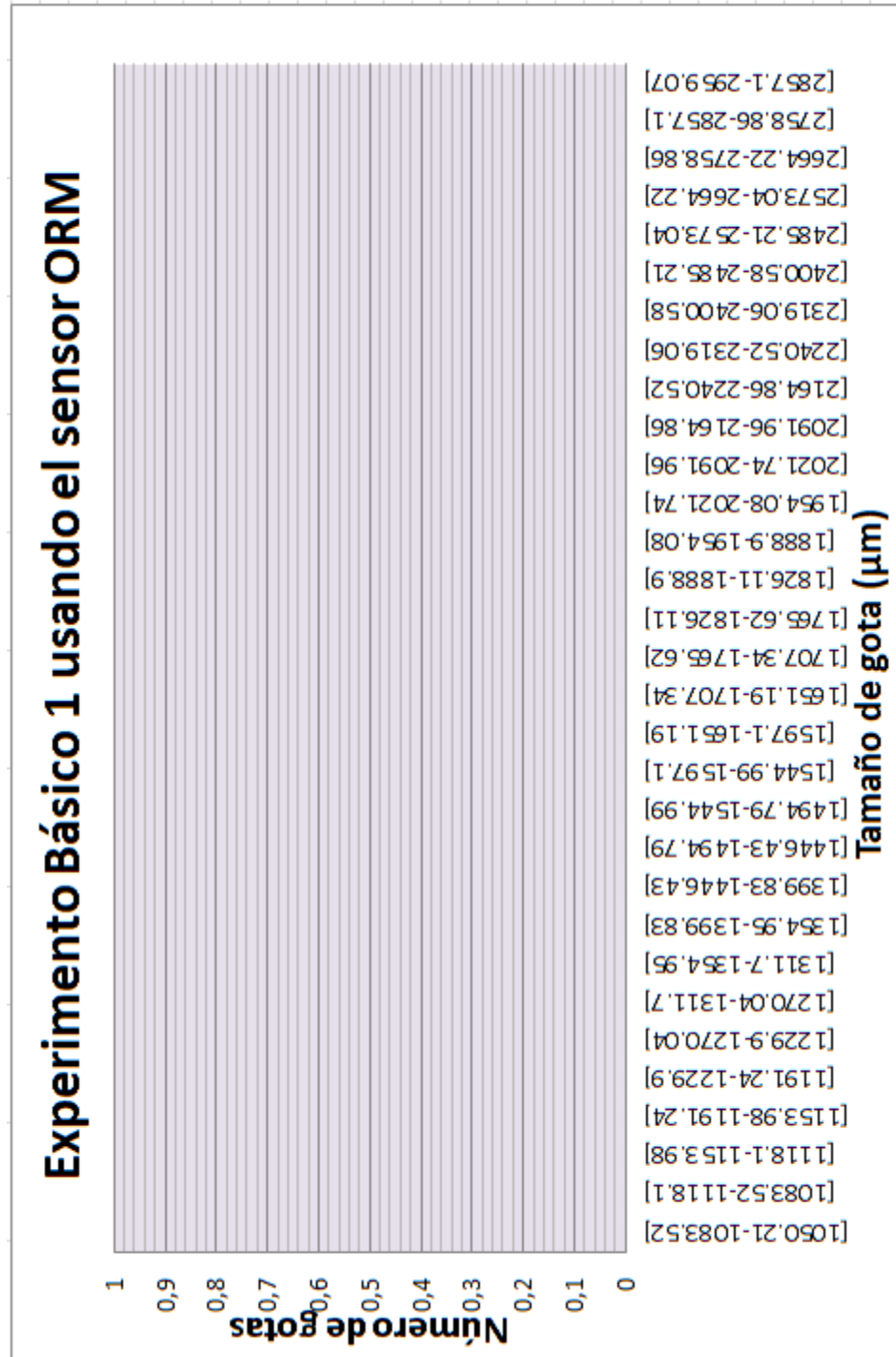


Figura 44. Gráfica 4 Número de gotas experimento básico 1.



3- Para una fracción de agua 0,3 y aceite 0,7 los valores medidos por el sensor ORM son presentados desde la figura 45 a la 48.

Figura 45. Gráfica 1 Número de gotas experimento básico 2.

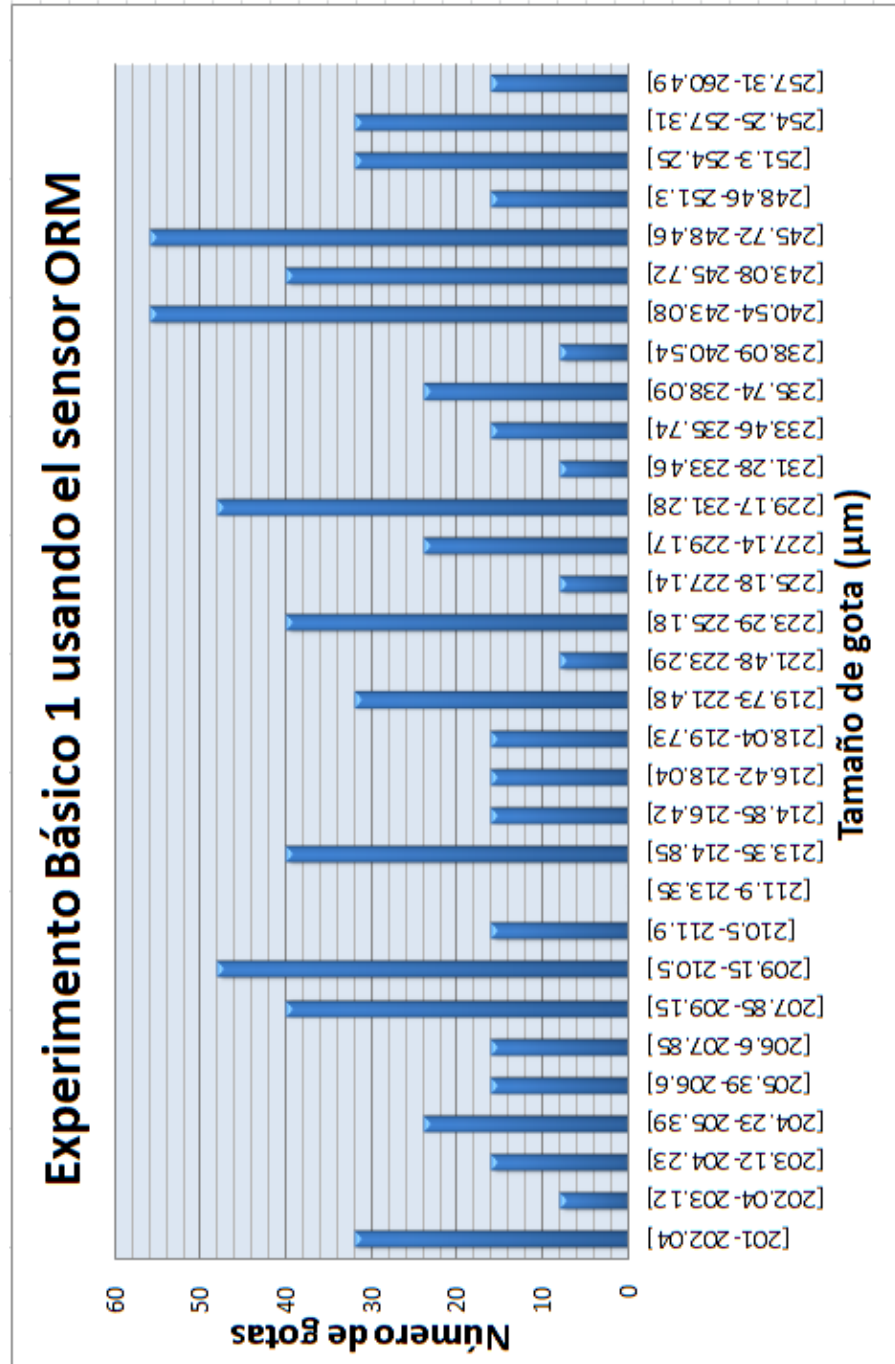


Figura 46. Gráfica 2 Número de gotas experimento básico 2.

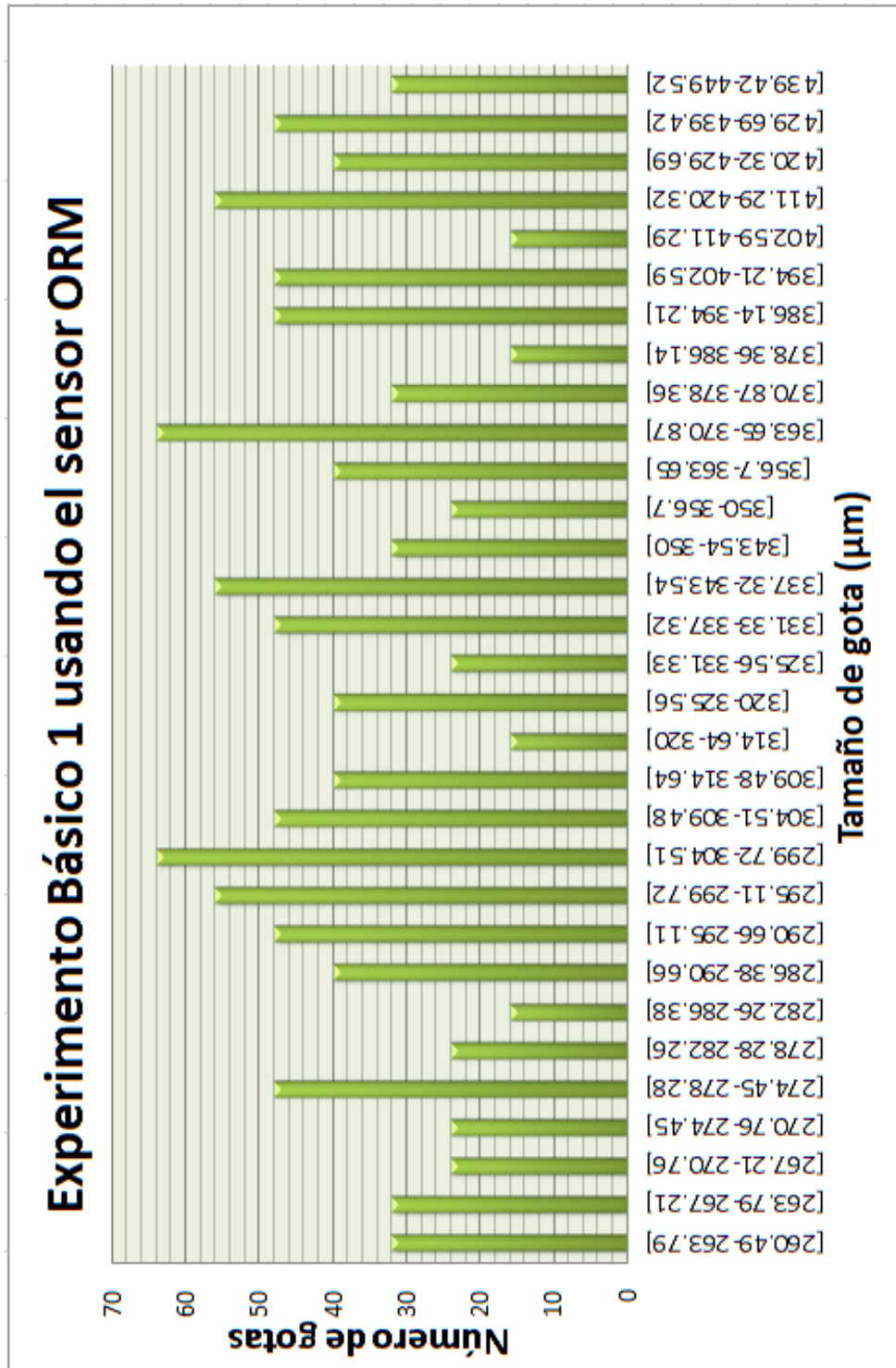


Figura 47. Gráfica 3 Número de gotas experimento básico 2.

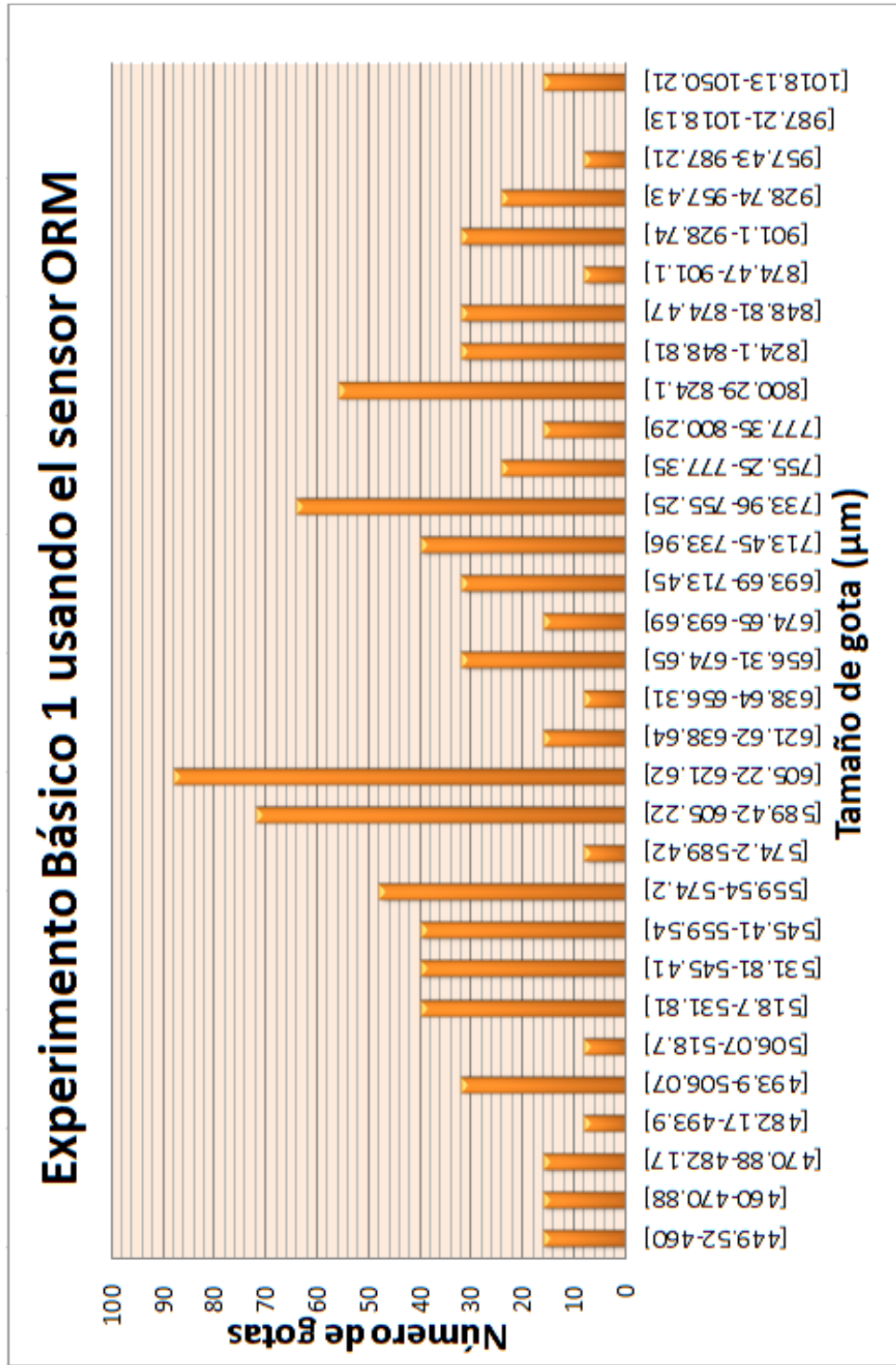
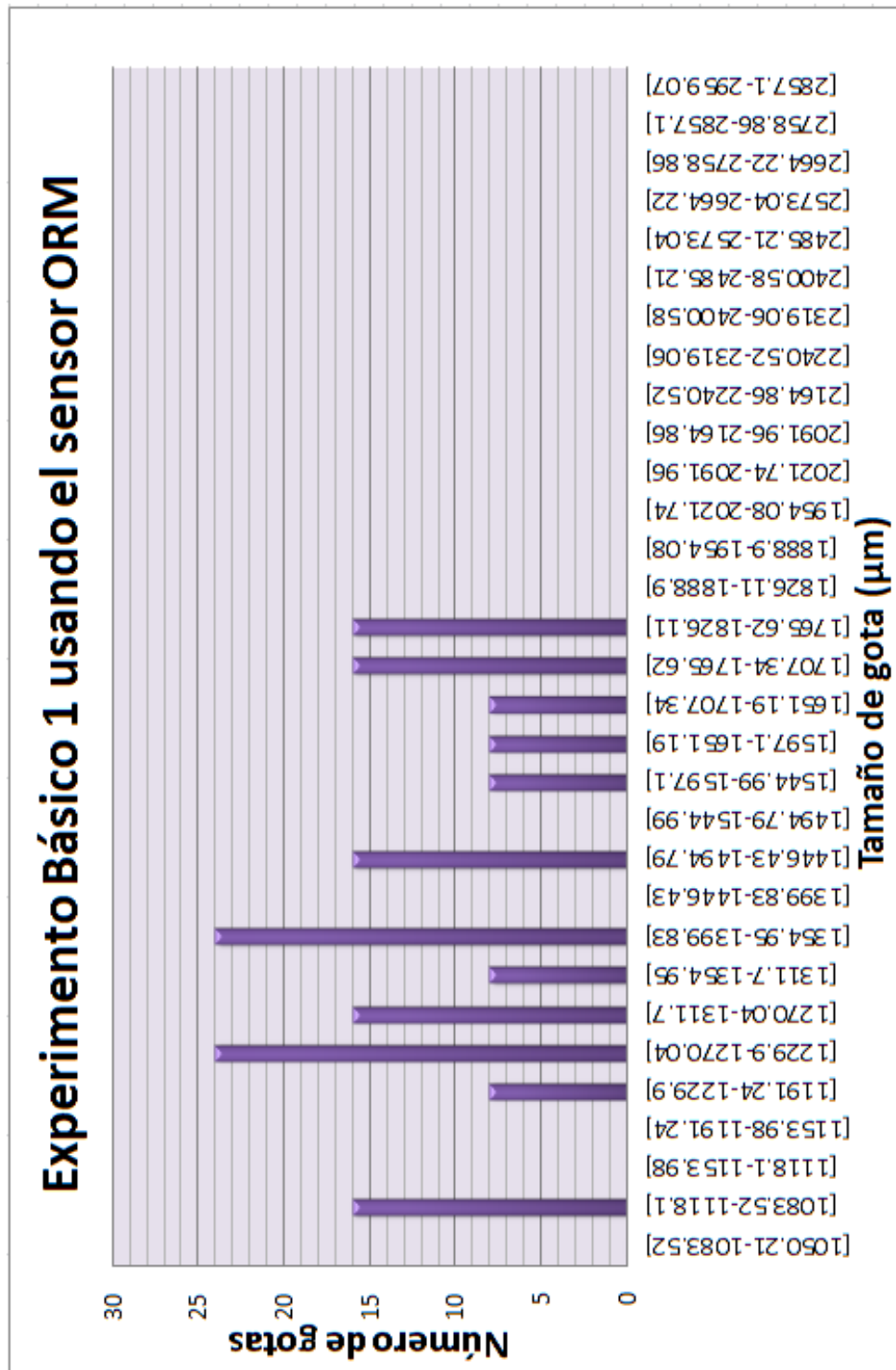


Figura 48. Gráfica 4 Número de gotas experimento básico 2.



- 4- Para una fracción de agua 0,15 y aceite 0,85 los valores medidos por el sensor ORM son presentados desde la figura 49 a la 52.

Figura 49. Gráfica 1 Número de gotas experimento básico 3.

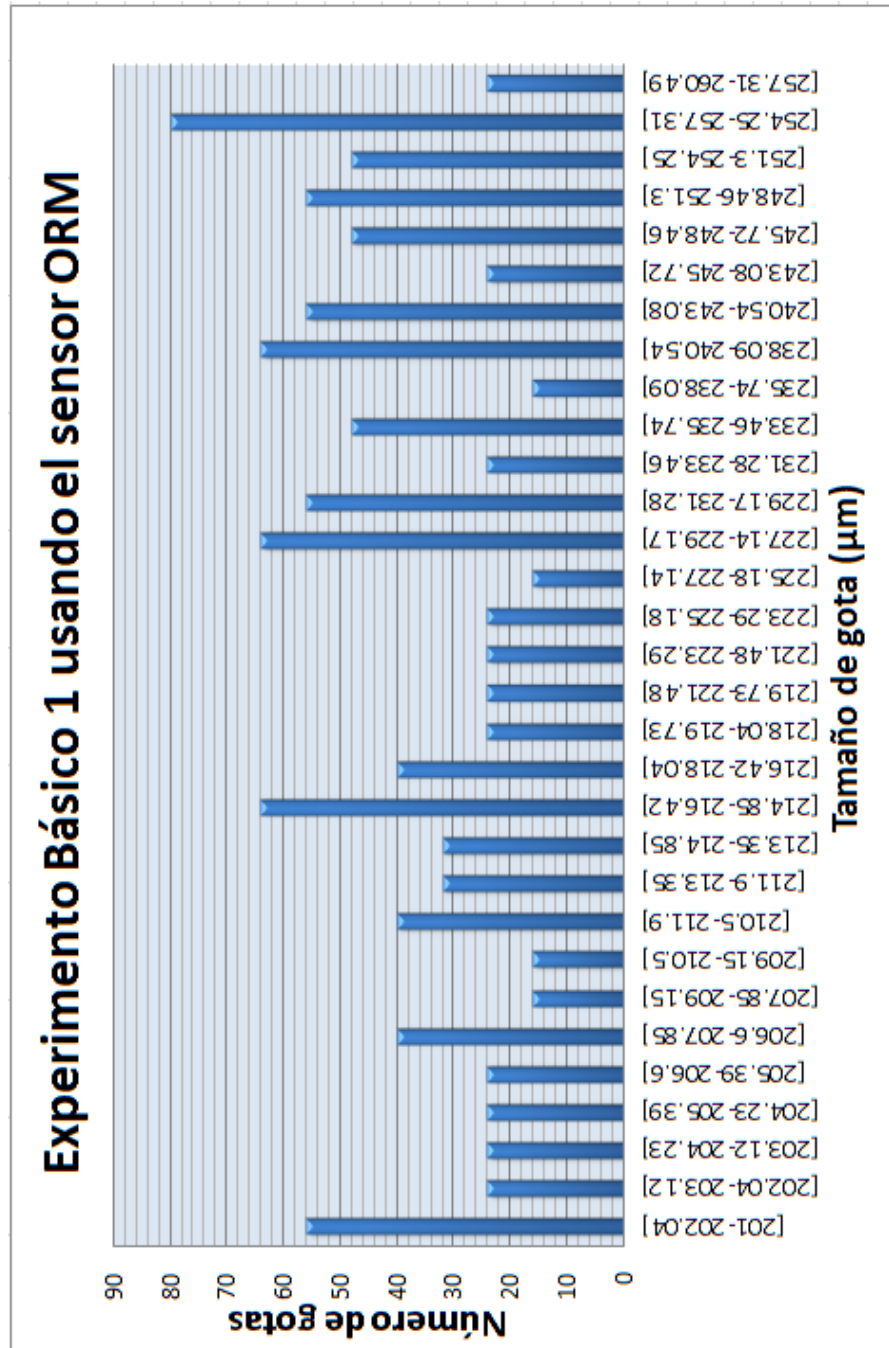


Figura 50. Gráfica 2 Número de gotas experimento básico 3.

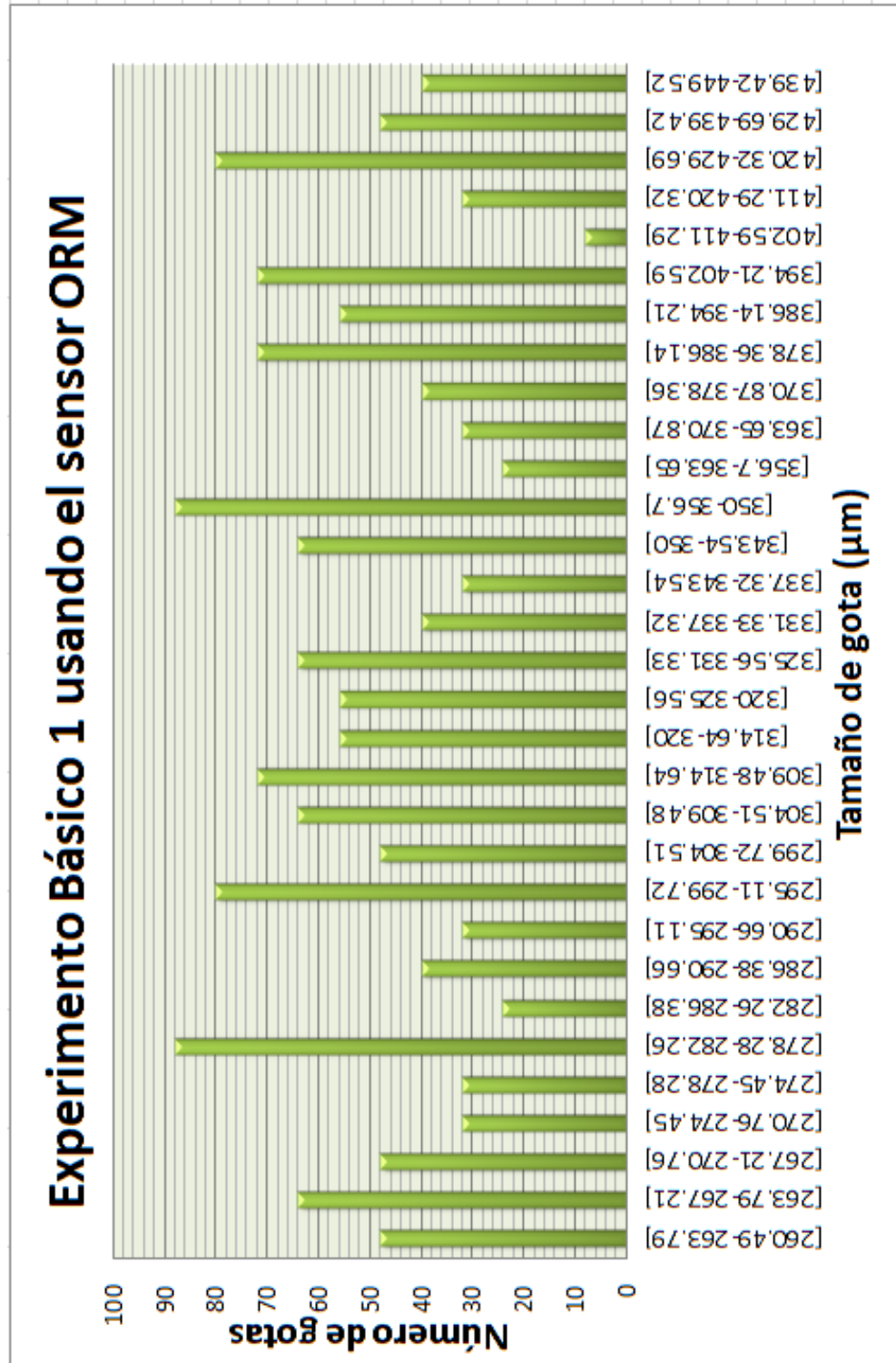


Figura 51. Gráfica 3 Número de gotas experimento básico 3.

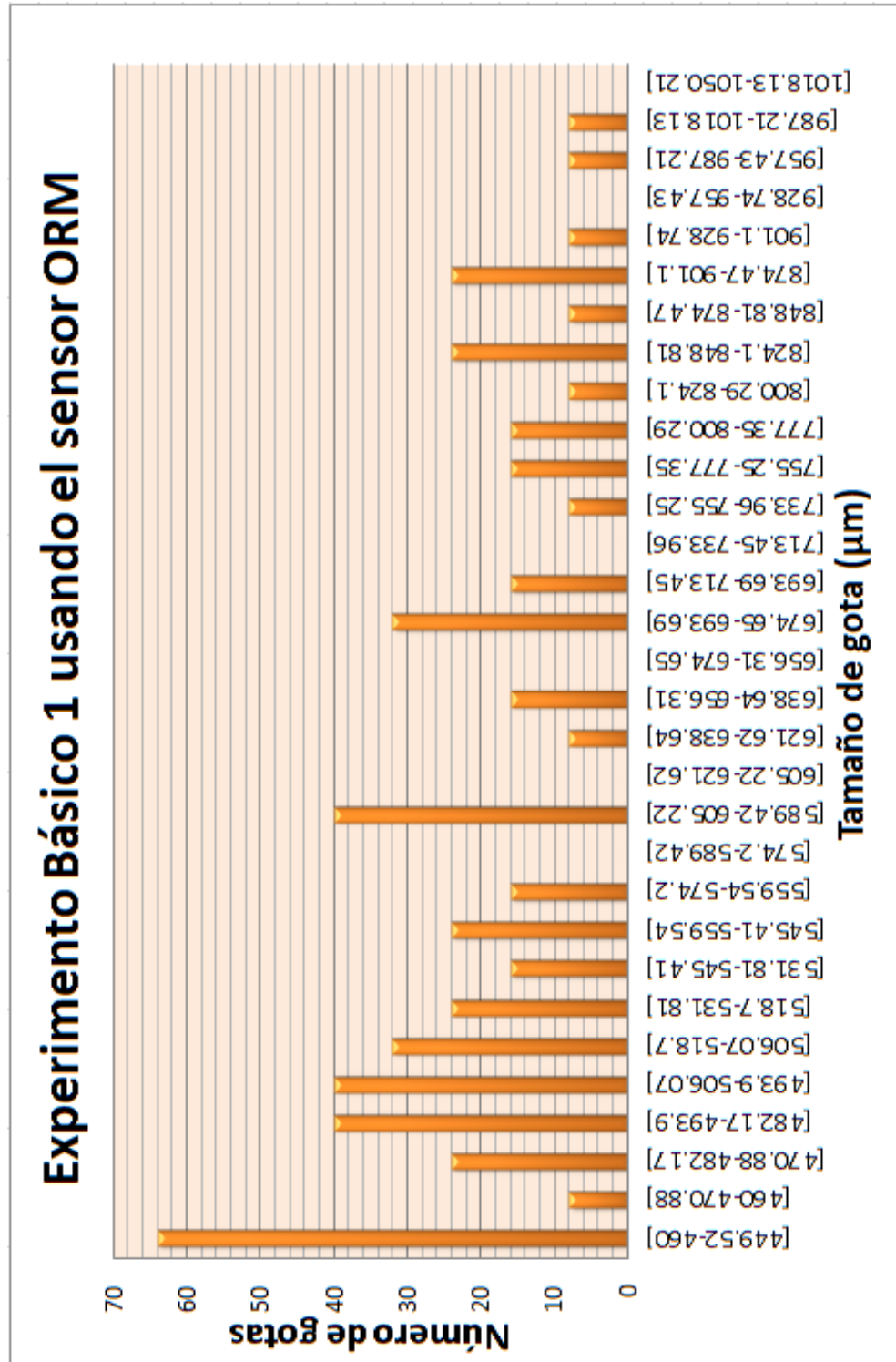
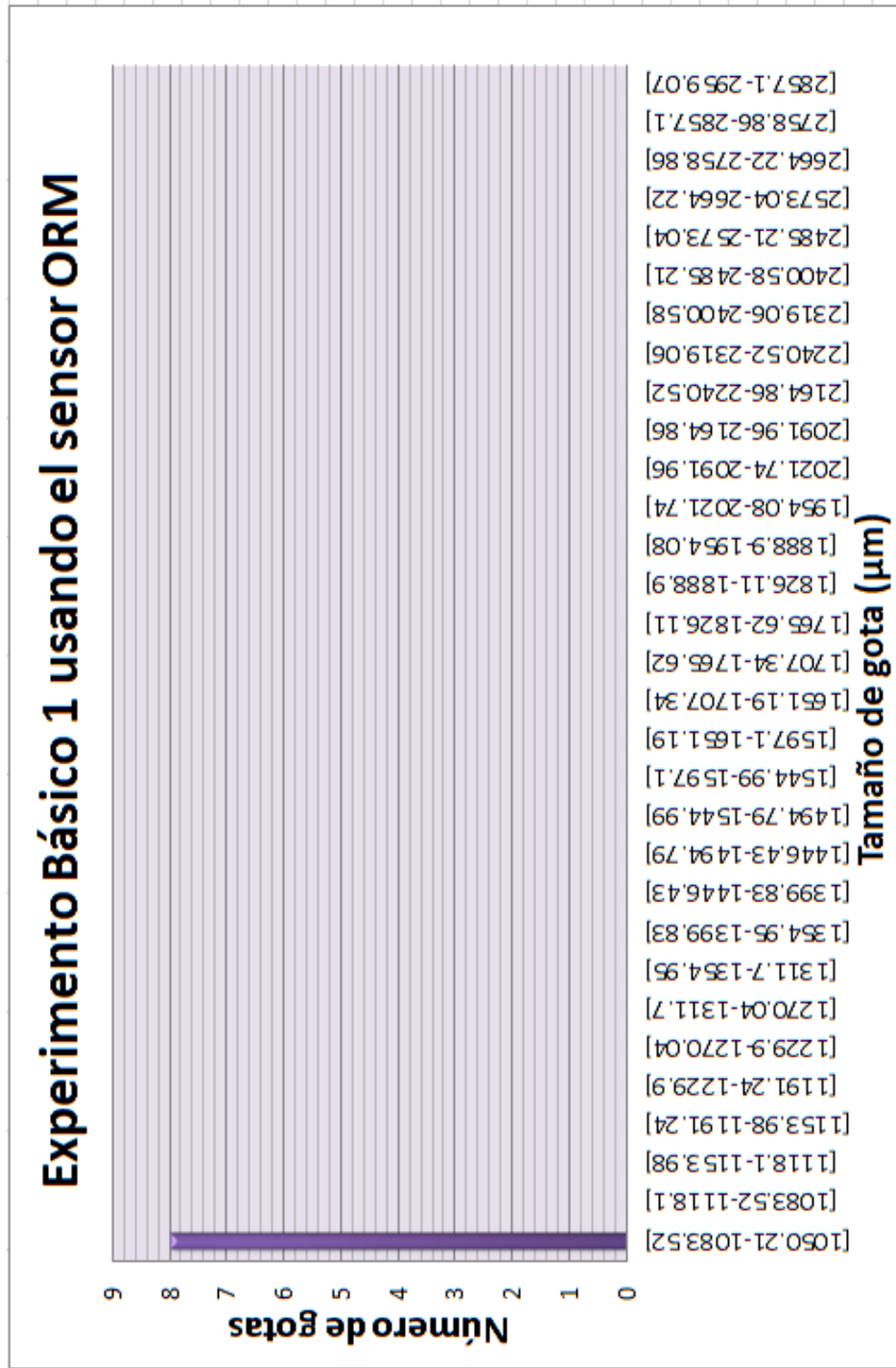


Figura 52. Gráfica 4 Número de gotas experimento básico 3.



### **6.1.3 Comparación entre los Resultados Experimentos Básicos con el uso de la cámara de alta velocidad HSC y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM.**

De acuerdo a los diámetros calculados con el software i-speed suite y los videos filmados con la cámara de alta velocidad el diámetro de las gotas formadas en los 3 flujos multifásicos pueden oscilar entre 600 $\mu\text{m}$  y 1500 $\mu\text{m}$ , los diámetros de las gotas son muy variables, incluso en las imágenes se puede observar que hay gotas que pueden tener un diámetro menor a 600 $\mu\text{m}$  pero el software tiene complicaciones para medir gotas de este tamaño.

Los valores medidos por el sensor medidor de tamaño de partículas ORM fueron los siguientes: Para una fracción de agua 0.5 y aceite 0.5 la gota de mayor diámetro fue de 834 $\mu\text{m}$ , de menor diámetro 202.5 $\mu\text{m}$  y el diámetro promedio fue 451 $\mu\text{m}$ ; para una fracción de agua 0.3 y aceite 0.7 la gota de mayor diámetro fue de 1790 $\mu\text{m}$ , de menor diámetro 201.5 $\mu\text{m}$  y el diámetro promedio fue 471 $\mu\text{m}$ ; para una fracción de agua 0.15 y aceite 0.85 la gota de mayor diámetro fue de 1065 $\mu\text{m}$ , de menor diámetro 201.5 $\mu\text{m}$  y el diámetro promedio fue 345 $\mu\text{m}$ .

Después de obtener los resultados finales con cada instrumento de medición se puede decir que:

- Las técnicas de medición con el uso de la cámara HSC y el sensor ORM funcionan, y los valores medidos por cada instrumento en este experimento son muy cercanos a pesar de las limitaciones del software i-speed suite.
- Al software i-speed suite se le dificulta medir partículas con tamaños menores a 600 $\mu\text{m}$  y necesita un marco de referencia preferiblemente plano con dimensiones en micras para calibrar con mayor precisión el software y así los errores de medición sean bajos.
- El sensor ORM tiene preferencia de medición por partículas menores a 200 $\mu\text{m}$  debido a que estas partículas siempre se presentan en mayor cantidad, por tal razón el tiempo de medición entre el sensor y los fluidos

debe ser durante varios minutos para que el sensor pueda medir las partículas cercanas a  $3000\mu\text{m}$ .

- En las fracciones de aceite-agua usadas, a medida que se aumentó la fracción de aceite y se disminuyó la fracción de agua la cantidad de gotas medidas por el sensor ORM aumentó.

Con base en los resultados finales obtenidos en los experimentos básicos, se llevaron a cabo algunas propuestas para obtener mejores resultados en el experimento principal, como el diseño de una sección de visualización plana de acrílico y un patrón ajedrezado guía para la calibración de la cámara, por otro lado, para el sensor ORM fue diseñada una pieza para que estuviera en contacto directo con el flujo de forma fija y así aumentar el periodo de tiempo de toma de datos.

## **6.2 Resultados Experimento Principal.**

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos después de la realización del experimento principal en el oleoducto piloto del LETeF con el uso de las técnicas de medición cámara de alta velocidad y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM.

### **6.2.1 Resultados Experimento Principal con el uso de la cámara de alta velocidad.**

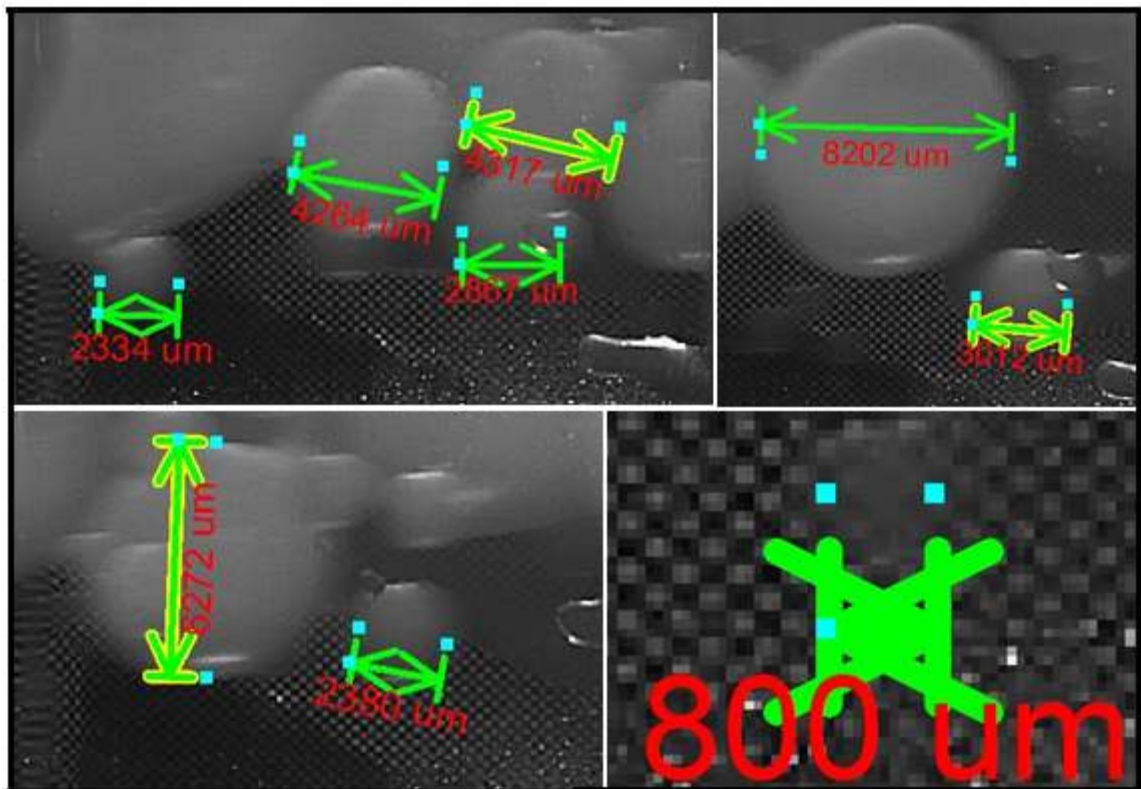
El procedimiento para calcular el diámetro de las gotas que se formaron en estos experimentos con el uso de la técnica de medición cámara de alta velocidad y su software i-speed Suite es presentado en el anexo H. En este experimento principal fue simulado un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y un flujo multifásico aceite-agua anular presentados en la sección 2.3.2. Las velocidades superficiales utilizadas para este proyecto fueron: Primero  $0,1(\text{m/s})$  para el aceite y  $0,2(\text{m/s})$  para el agua, segundo  $0,12(\text{m/s})$  para el aceite y  $0,2(\text{m/s})$

para el agua, tercero 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua, los tres flujos multifásicos simulados corresponden al flujo multifásico estratificado con mistura en la interface y para el flujo multifásico aceite-agua anular la velocidad usada fue: 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua.

### 6.2.1.1 Experimento Principal 1 con el uso de la HSC.

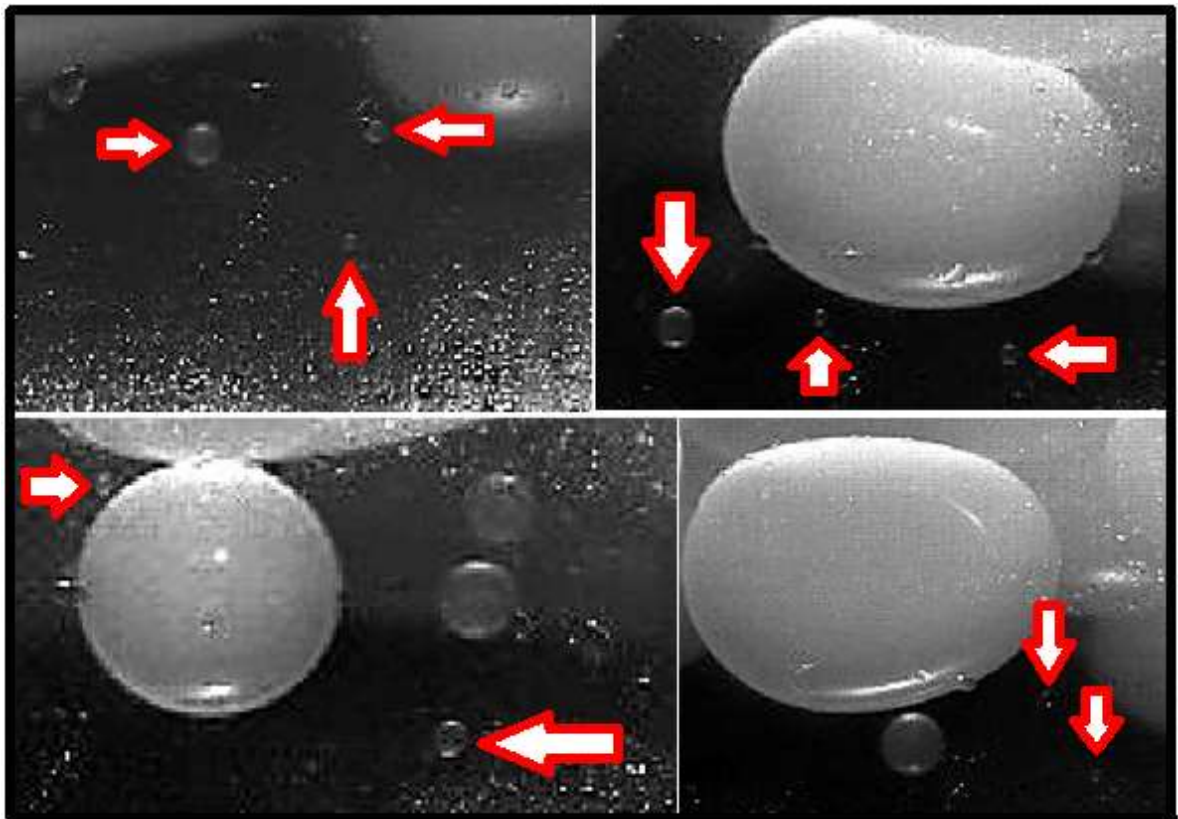
Los resultados obtenidos para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,1(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua se pueden ver en la Figura 53.

Figura 53. Gotas experimento principal 1 con velocidades superficiales de 0,1(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua.



En la Figura 53 se pueden observar algunas de las gotas formadas en el flujo multifásico, se midieron diámetros desde  $800\mu\text{m}$  hasta  $8202\mu\text{m}$ . Al observar los videos y los diámetros calculados, se puede decir que las gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de  $0,1(\text{m/s})$  para el aceite y  $0,2(\text{m/s})$  para el agua son de diámetros muy variables ( $800\mu\text{m}-8202\mu\text{m}$ ) y se puede encontrar una alta diferencia de tamaño entre una gota y otra. Las características finales del video filmado para obtener las imágenes de la Figura 53 fueron: Length: 805 frames, Frame Rate: 500 fps, Shutter:  $2000\ \mu\text{sec}$ , Trigger: 50%, Image Size:  $1280 \times 1024$ .

Figura 54. Gotas pequeñas Experimento Principal 1 con aumento de fps.



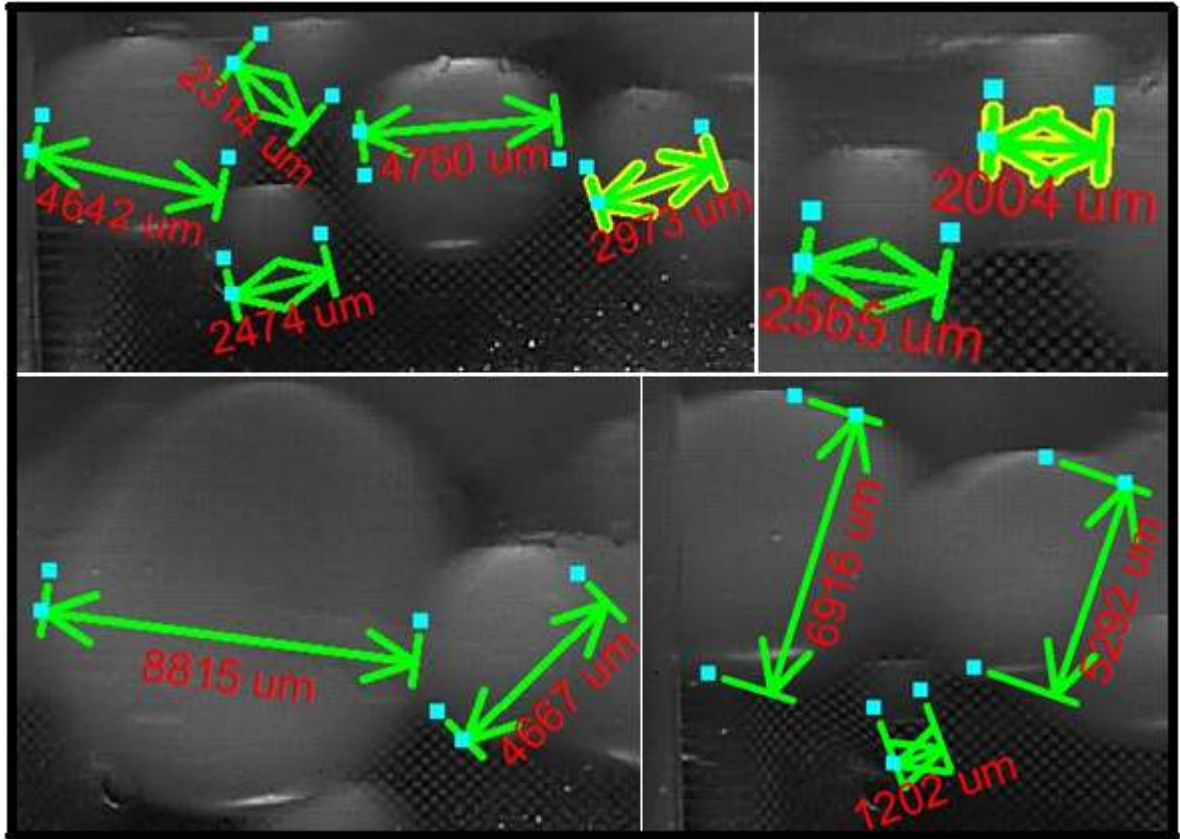
Por otro lado, las gotas menores a  $1000\mu\text{m}$  se distorsionaban en los videos filmados debido a su velocidad y claramente dificultó la medición de sus diámetros, un ejemplo de esto está en la Figura 53 (gota inferior derecha), donde se tiene una gota de un diámetro de  $800\mu\text{m}$ . En la figura 53 no se puede observar claramente la forma circular de la gota, por el contrario, se puede observar una partícula borrosa. Esta pequeña gota de  $800\mu\text{m}$  fue una de las pocas gotas pequeñas que se pudo medir y con dificultad, porque al observar el video se puede ver que hay gotas aún más pequeñas pero su medición se dificulta con las características iniciales usadas en el software i-speed suite, por tal razón, se realizaron nuevos videos para mejorar la calidad de imagen del video aumentando una de las características de la cámara, el número de fps(frames per second) de 500 a 1000, pero al realizar este cambio el patrón ajedrezado que fue instalado en la tubería para usar como calibración, se oscurecía y dificultaba la calibración del software, pero se obtuvieron las imágenes de la Figura 54. Las gotas pequeñas de la Figura 54 tenían un diámetro aproximado a  $300\mu\text{m}$  según el software i-speed suite.

La temperatura promedio del día fue de  $24^{\circ}\text{c}$  y fue la misma para todos los experimentos principales.

#### **6.2.1.2 Experimento Principal 2 con el uso de la HSC.**

Los resultados obtenidos para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de  $0,12(\text{m/s})$  para el aceite y  $0,2(\text{m/s})$  para el agua se pueden ver en la Figura 55.

Figura 55. Gotas experimento principal 2 con velocidades superficiales de 0,12(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua.

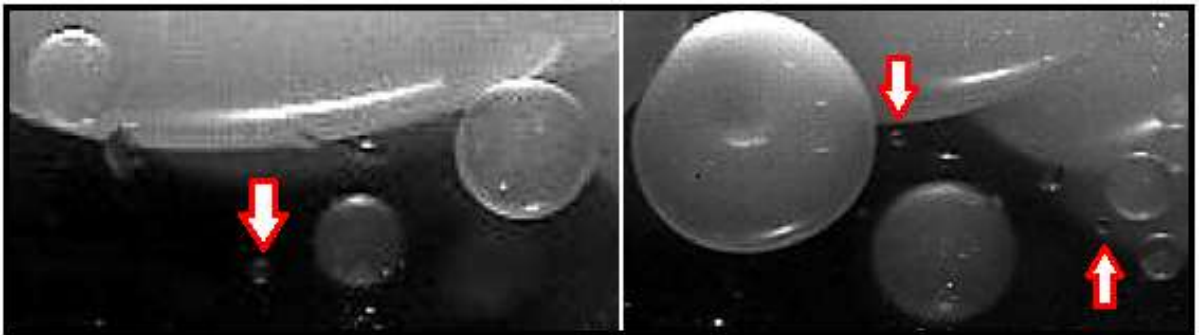


En la Figura 55 se pueden observar algunas de las gotas formadas en el flujo multifásico, se midieron diámetros desde 1200 $\mu\text{m}$  hasta 8815 $\mu\text{m}$ . Al observar los videos y los diámetros calculados, se puede decir que las gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,12(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua son de diámetros muy variables (1200 $\mu\text{m}$ -8815 $\mu\text{m}$ ) y se puede encontrar una alta diferencia de tamaño entre una gota y otra. Las características finales del video filmado para obtener las imágenes de la Figura 55 fueron: Length: 669 frames, Frame Rate: 500 fps, Shutter: 2000  $\mu\text{sec}$ , Trigger: 50%, Image Size: 1280x1024.

Por otro lado, al igual que el anterior experimento las gotas presentaron distorsión en los videos filmados pero en este caso se presentó en gotas menores a  $1200\mu\text{m}$ , un ejemplo de esto está en la Figura 55, donde la última imagen se puede ver una gota de un diámetro de  $1202\mu\text{m}$ , pero en la imagen no se puede observar claramente la forma circular de la gota. Al observar el video se puede ver que hay gotas aún más pequeñas pero su medición se dificulta con el uso software i-speed suite. Al igual que el anterior experimento, se realizó un nuevo video para mejorar la calidad de las imágenes y se obtuvieron gotas como las vistas en la Figura 56 cercanas a  $300\mu\text{m}$  de diámetro.

Una de las diferencias que se observó en el video del experimento (velocidades superficiales de  $0,12(\text{m/s})$  para el aceite y  $0,2(\text{m/s})$  para el agua) comparado con el anterior (velocidades superficiales de  $0,1(\text{m/s})$  para el aceite y  $0,2(\text{m/s})$  para el agua) fue el aumento del número de gotas de tamaño medio, es decir, las gotas con un diámetro entre  $2000-4500\mu\text{m}$  aproximadamente.

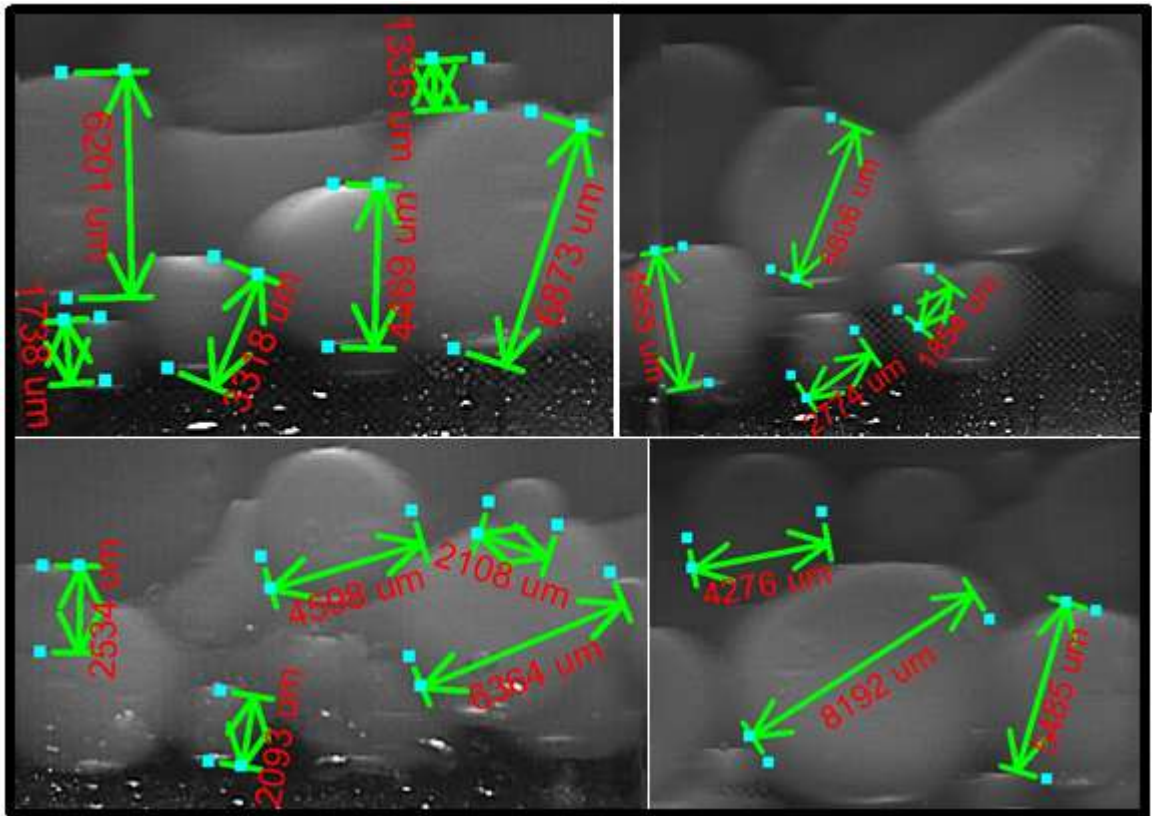
Figura 56. Gotas pequeñas Experimento Principal 2 con aumento de fps.



### 6.2.1.3 Experimento Principal 3 con el uso de la HSC.

Los resultados obtenidos para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua se pueden ver en la Figura 57.

Figura 57. Gotas experimento principal 3 con velocidades superficiales de 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua.



En la Figura 57 se pueden observar algunas de las gotas formadas en el flujo multifásico, se midieron diámetros desde 1700μm hasta 8192μm. Al observar los videos y los diámetros calculados, se puede decir que las gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua son

de diámetros muy variables ( $1700\mu\text{m}$ - $8192\mu\text{m}$ ) y se puede encontrar una alta diferencia de tamaño entre una gota y otra. Las características finales del video filmado para obtener las imágenes de la Figura 57 fueron: Length: 1502 frames, Frame Rate: 500 fps, Shutter:  $2000\ \mu\text{sec}$ , Trigger: 50%, Image Size:  $1280 \times 1024$ .

Al igual que los dos anteriores experimentos muchas gotas se mostraban borrosas en los videos, en este caso, eran las gotas menores a  $1700\mu\text{m}$  aproximadamente, las gotas con tamaños pequeños cercanos a  $300\mu\text{m}$  de diámetro son mostradas en la Figura 59. Adicionalmente, así como en el experimento con velocidades superficiales de  $0,12(\text{m/s})$  para el aceite y  $0,2(\text{m/s})$  para el agua el número de gotas de aceite aumentó, pero en este experimento, las gotas aumentaron considerablemente, de tal forma, que las gotas estaban junto a otras en todo el recorrido con tamaños variables, pero se observó nuevamente un gran número de gotas de tamaño medio ( $2000$ - $4500\mu\text{m}$ ), por otro lado, las gotas que presentaban un gran tamaño, mayores a  $8300\mu\text{m}$  aproximadamente, perdían su forma geométrica circular y formaban geometrías ovaladas como se observa en la Figura 58.

Figura 58. Gotas experimento principal 3 con geometría ovalada.

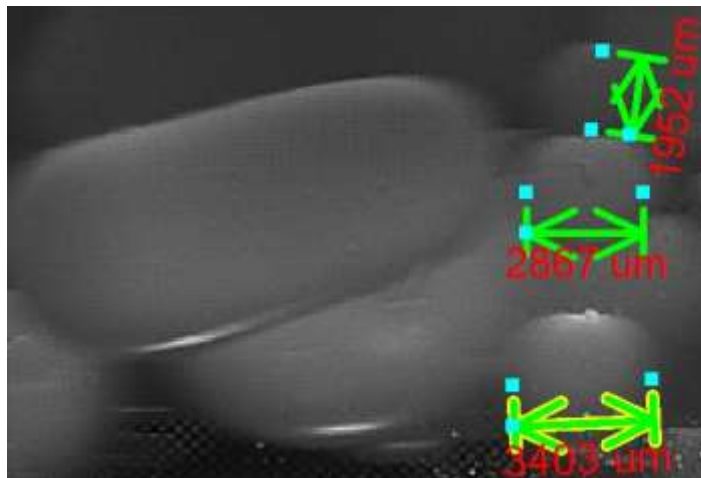
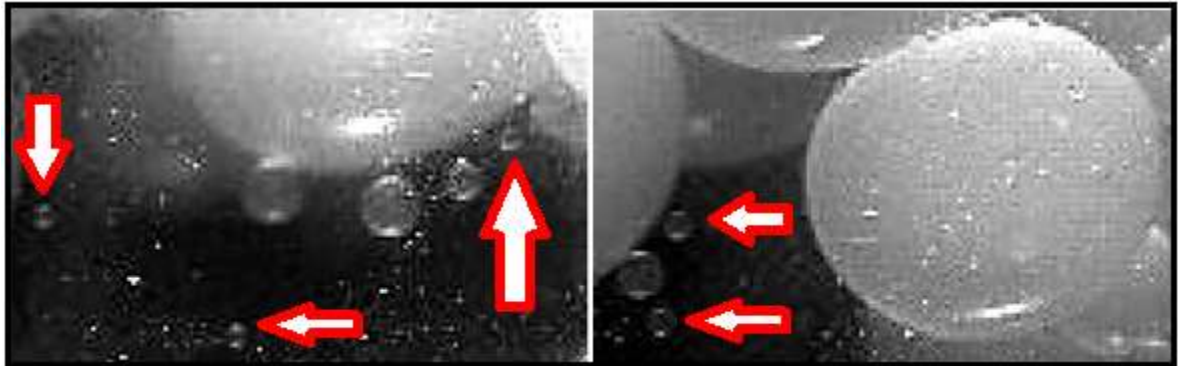


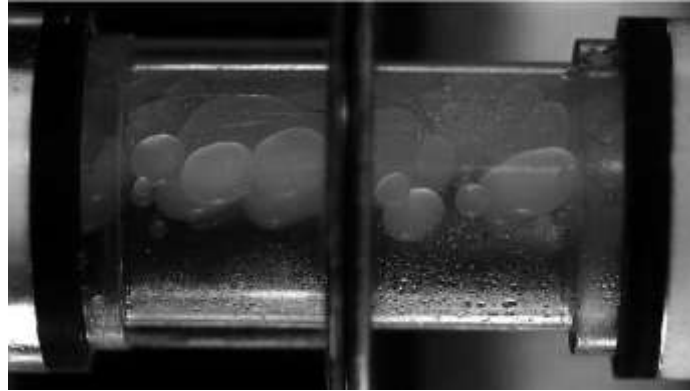
Figura 59. Gotas pequeñas Experimento Principal 3 con aumento de fps.



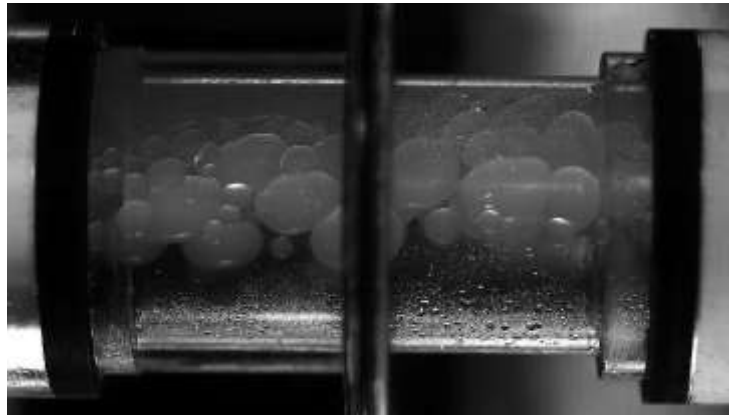
Los resultados finales de los 3 experimentos principales donde se simuló un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface para tres velocidades diferentes de aceite-agua en el oleoducto piloto de LETeF fueron presentados en la sección 3.4, los resultados de cada experimento fueron similares, donde se calcularon los diámetros de gotas de aceite que se transfirieron al agua con el uso del software i-speed suite, los tamaños de gotas para cada experimento es prácticamente el mismo, donde se obtuvieron valores que van desde 300 $\mu\text{m}$  hasta 8200 $\mu\text{m}$  aproximadamente para cada experimento y la diferencia fue la cantidad de gotas que se presentaron en cada experimento, donde a medida que se aumentó la velocidad superficial del aceite aumentaron el número de gotas de aceite en agua (Figura 60) pero los tamaños de las gotas siguieron siendo muy variables.

Figura 60. Flujo multifásico: a) Experimento Principal 1, b) Experimento Principal 2, c) Experimento Principal 3.

a)



b)



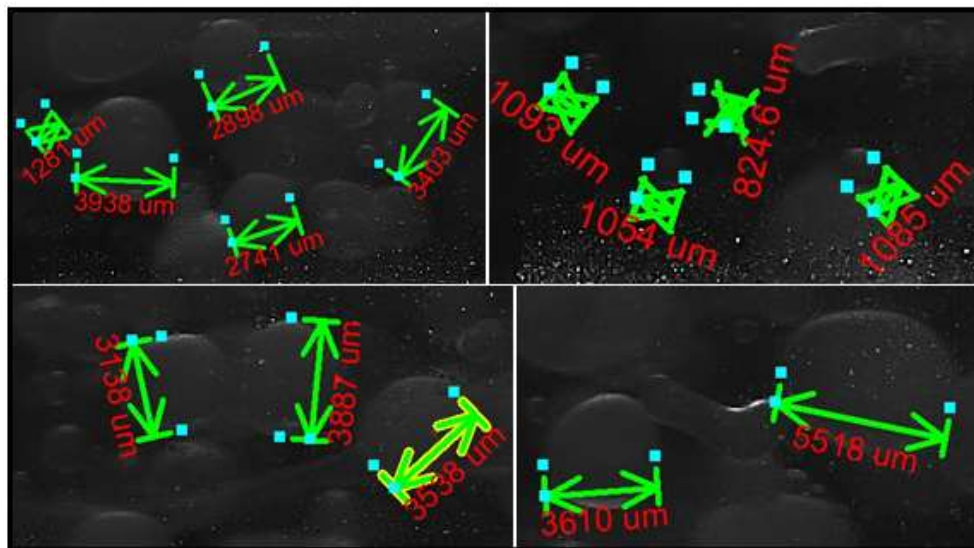
c)



#### 6.2.1.4 Experimento Principal 4 con el uso de la HSC.

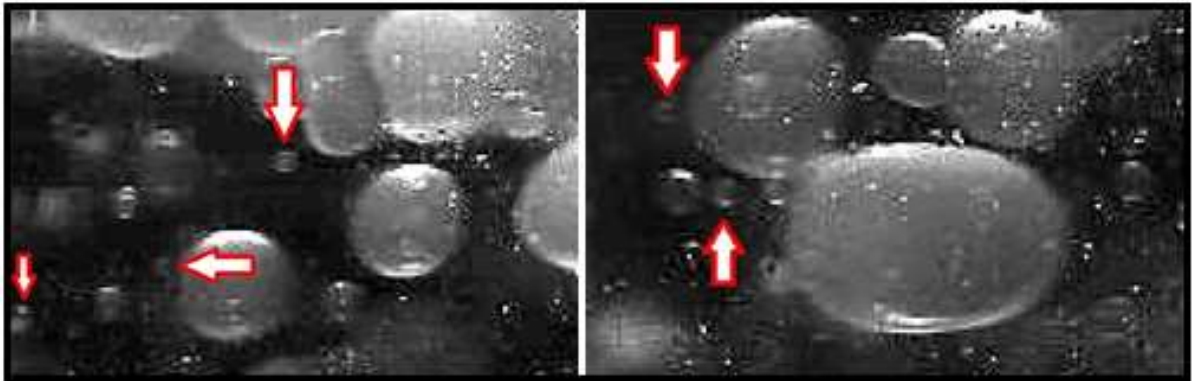
Los resultados obtenidos para un flujo multifásico aceite-agua anular y velocidad superficial de 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua se pueden ver en la Figura 61.

Figura 61. Gotas experimento principal 4 con velocidades superficiales de 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua.



En la Figura 61 se pueden observar algunas de las gotas formadas en el flujo multifásico anular, se midieron diámetros desde  $300\mu\text{m}$  hasta  $5500\mu\text{m}$ . Al observar los videos y los diámetros calculados, se puede decir que las gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico aceite-agua anular y velocidades superficiales de  $0,5(\text{m/s})$  para el aceite y  $1,5(\text{m/s})$  para el agua son de diámetros muy variables ( $300\mu\text{m}$ - $5500\mu\text{m}$ ) y se puede encontrar una alta diferencia de tamaño entre una gota y otra. Las características finales del video filmado para obtener las imágenes de la Figura 61 fueron: Length: 1209 frames, Frame Rate: 750 fps, Shutter:  $133\ \mu\text{sec}$ , Trigger: 50%, Image Size:  $1280 \times 1024$ .

Figura 62. Gotas pequeñas Experimento Principal 4.



Medir el diámetro de las gotas en este experimento fue complicado, primero por el gran número de gotas que se formaron en este experimento y segundo las velocidades superficiales son muy altas, donde después de variar el número de fps de la cámara se presentaron distorsiones de las gotas en los videos filmados, pero finalmente se obtuvieron los diámetros presentados en la Figura 61, por otro lado, nuevamente se presentaron gotas muy pequeñas cercanas a las  $300\mu\text{m}$  de diámetro mostradas en la Figura 62 y las gotas que tenían un diámetro mayor a  $5500\mu\text{m}$  aproximadamente perdían su forma circular y formaban gotas ovaladas o alargadas.

Figura 63. Flujo multifásico experimento principal 4.



### **6.2.2 Resultados Experimento Principal con el uso del sensor medidor de tamaño de partículas ORM.**

El procedimiento para calcular el diámetro de las gotas que se formaron en estos experimentos con el uso de la técnica de medición sensor medidor de tamaño de partículas ORM es presentado en el anexo H. En este experimento principal fue simulado un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y un flujo multifásico aceite-agua anular presentados en la sección 2.3.2. Las velocidades superficiales utilizadas para este proyecto fueron: Primero 0,1(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua, segundo 0,12(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua, tercero 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua, los tres flujos multifásicos simulados corresponden al flujo multifásico estratificado con mistura en la interface y para el flujo multifásico aceite-agua anular la velocidad usada fue: 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua.

Si el lector desea ver con más detalle los resultados de los experimentos principales con el uso del sensor medidor de tamaño de partículas ORM puede revisar los anexos C, D, E, F.

1- Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,1(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua son presentados desde la figura 64 a la 67.

Figura 64. Gráfica 1 Número de gotas experimento Principal 1.

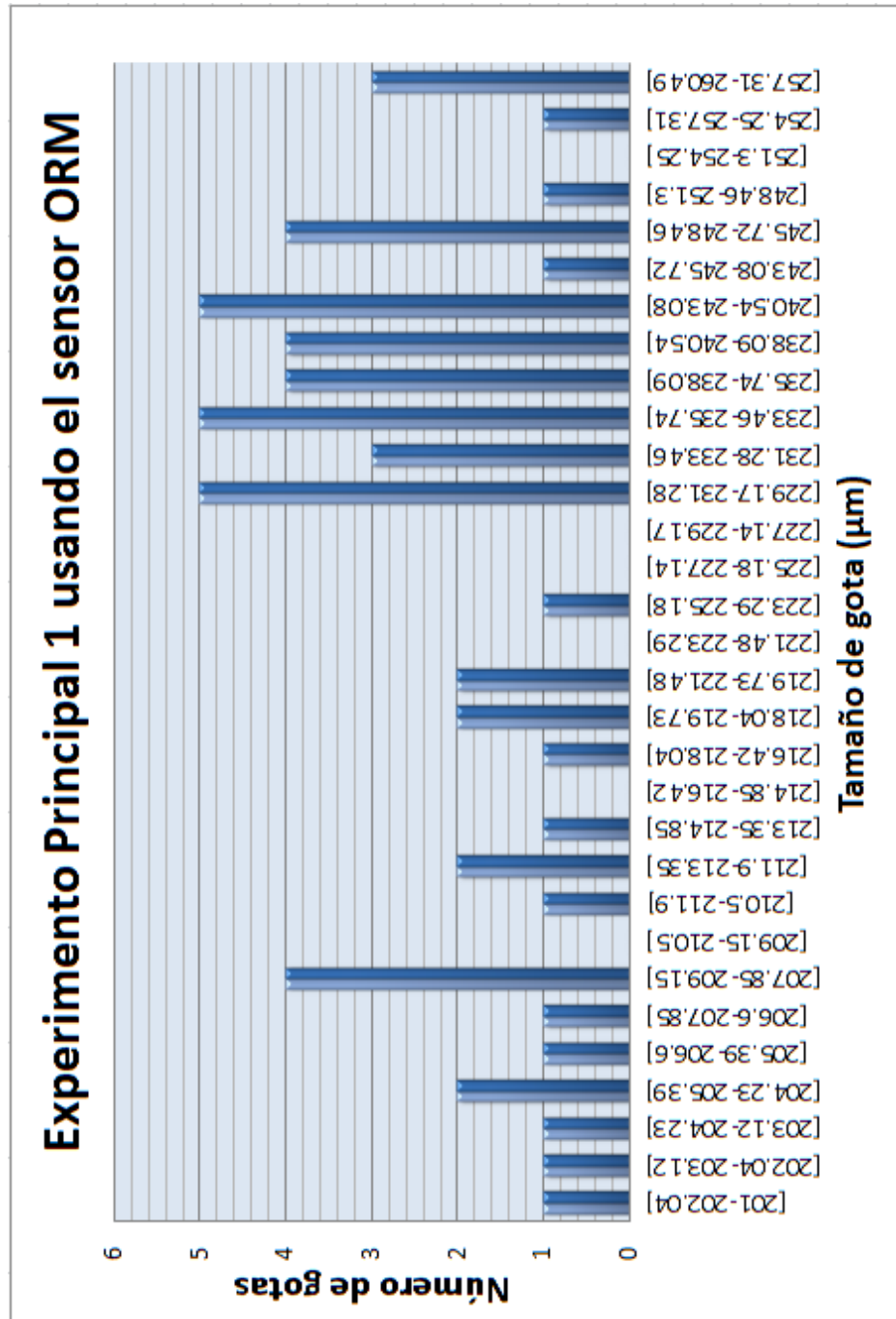


Figura 65. Gráfica 2 Número de gotas experimento Principal 1.

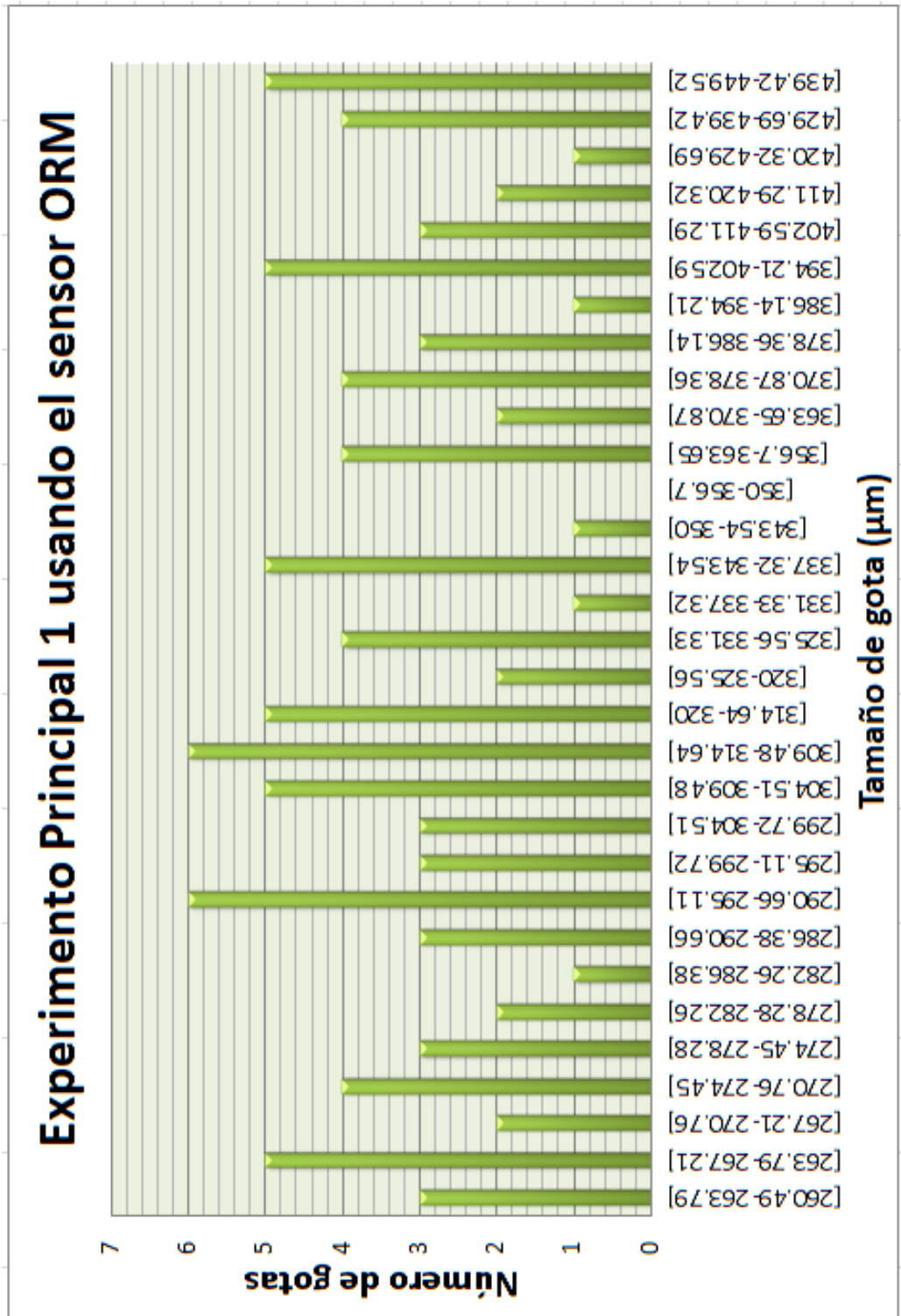


Figura 66. Gráfica 3 Número de gotas experimento Principal 1.

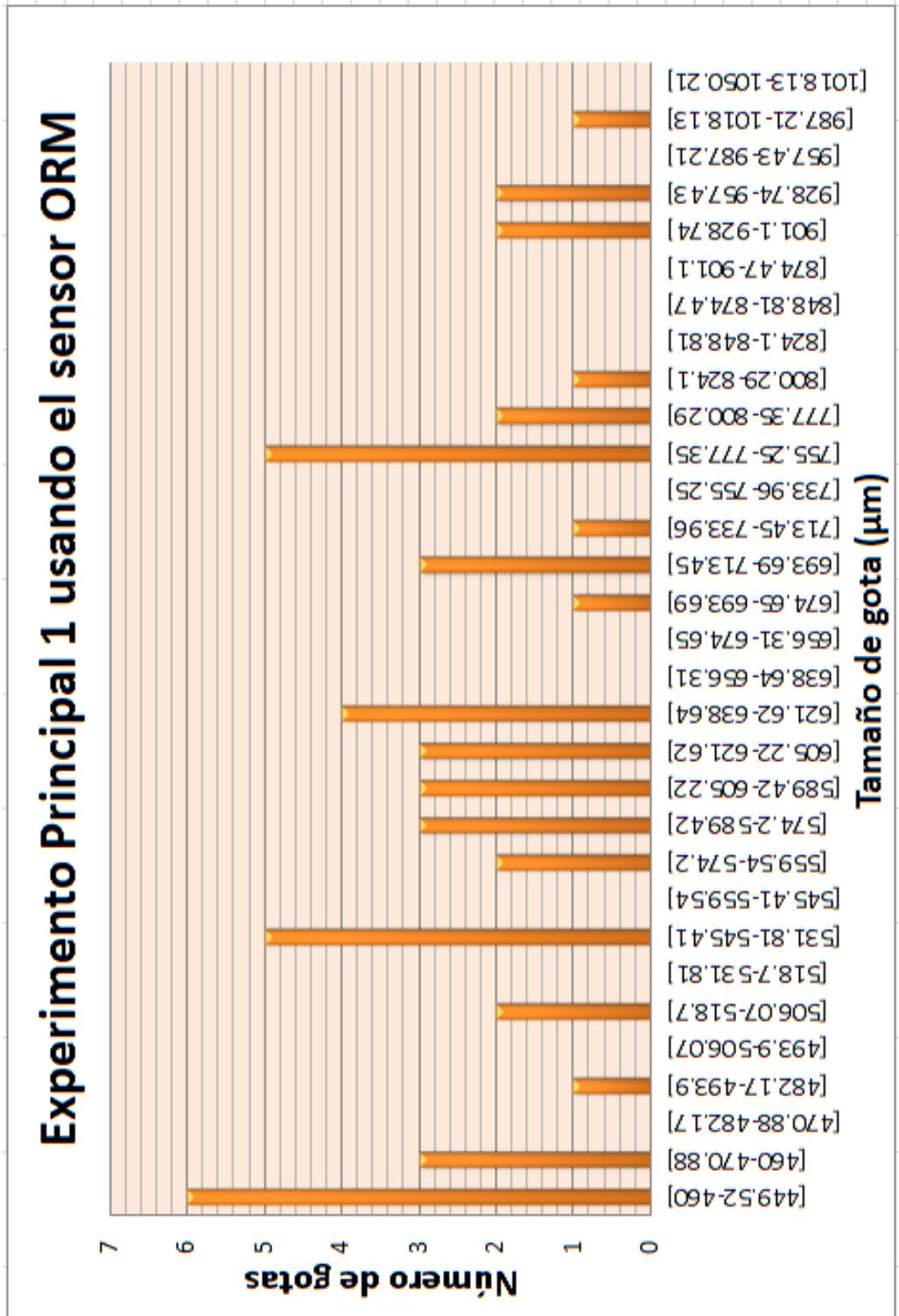
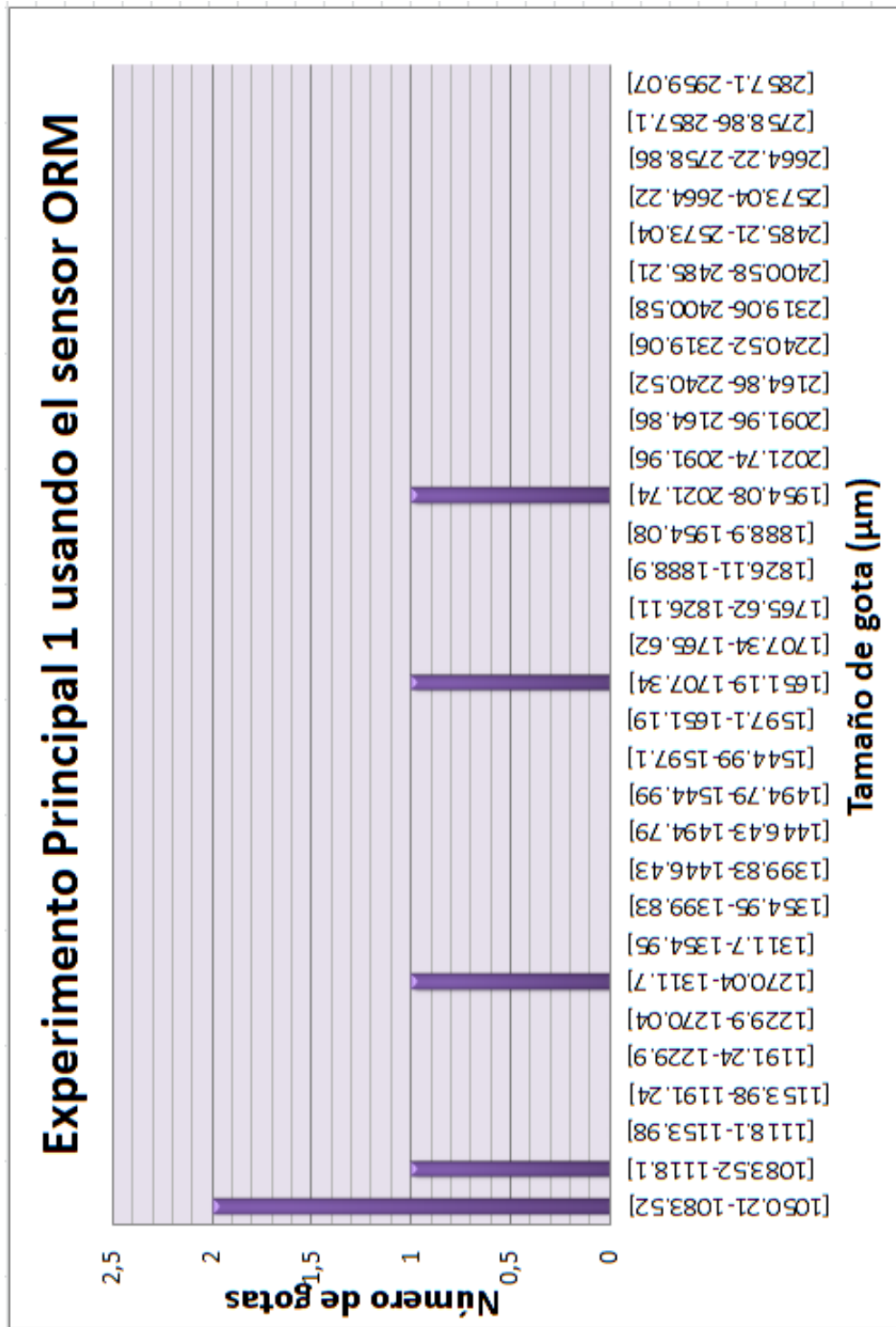


Figura 67. Gráfica 4 Número de gotas experimento Principal 1.



2- Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,12(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua son presentados desde la figura 68 a la 71.

Figura 68. Gráfica 1 Número de gotas experimento Principal 2.

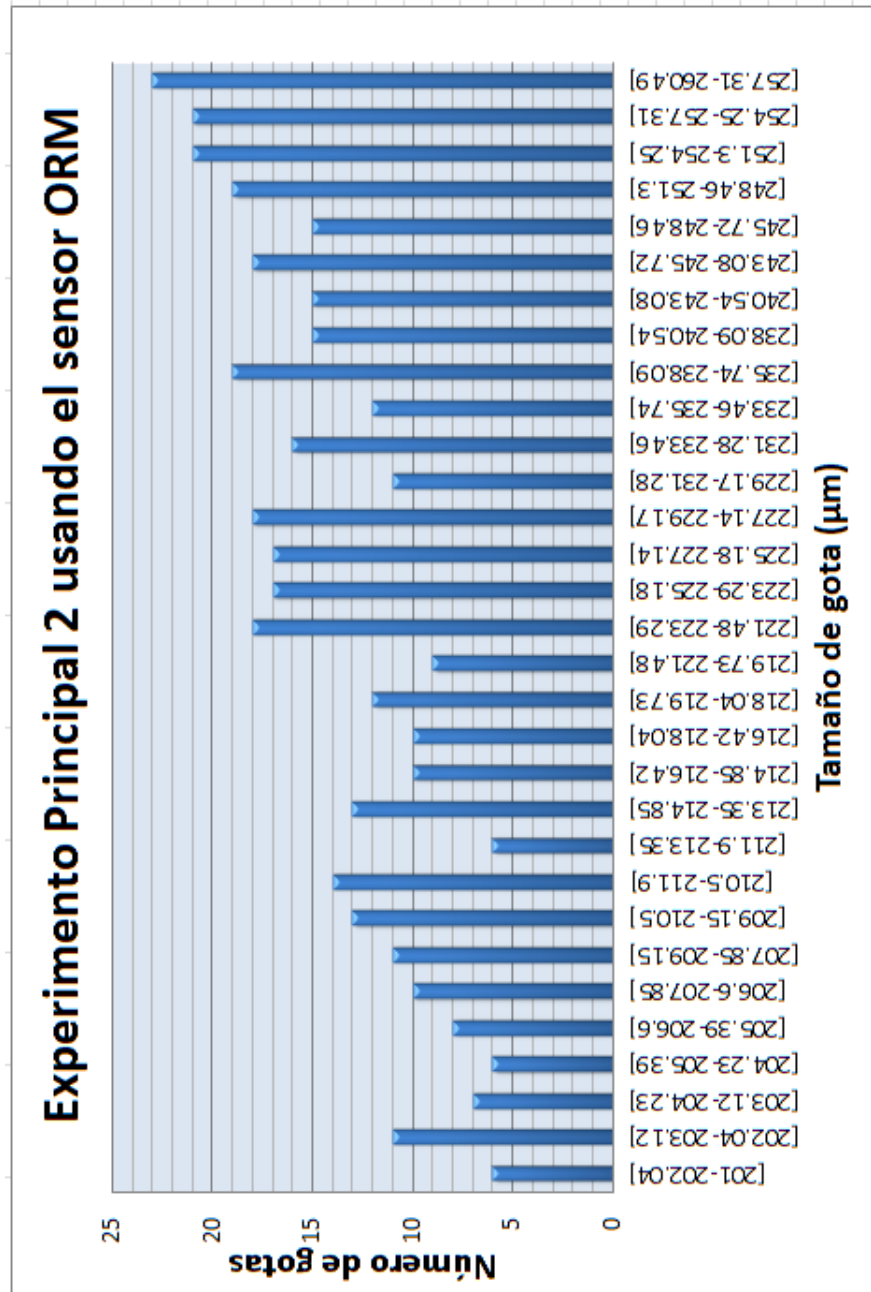


Figura 69. Gráfica 2 Número de gotas experimento Principal 2.

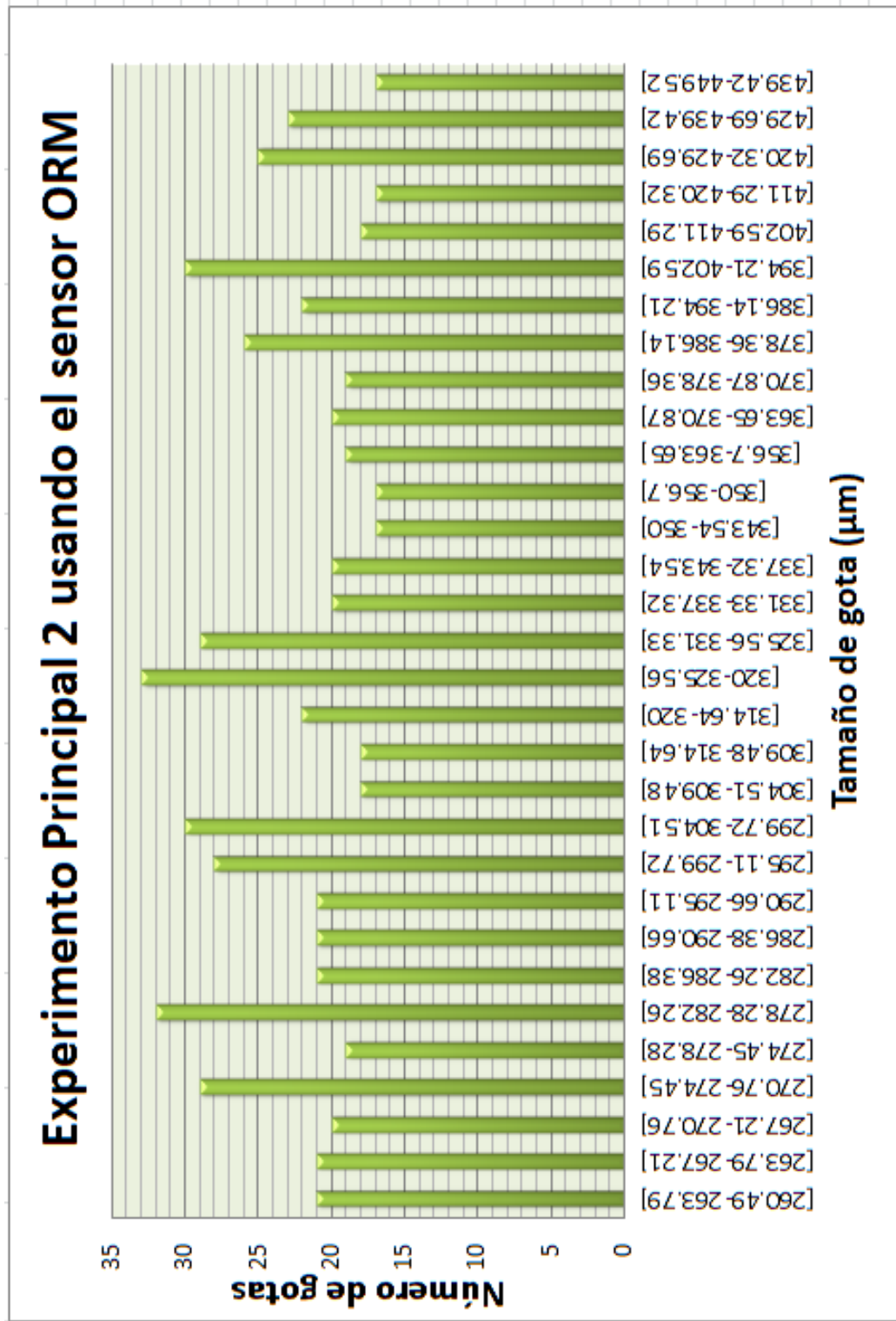


Figura 70. Gráfica 3 Número de gotas experimento Principal 2.

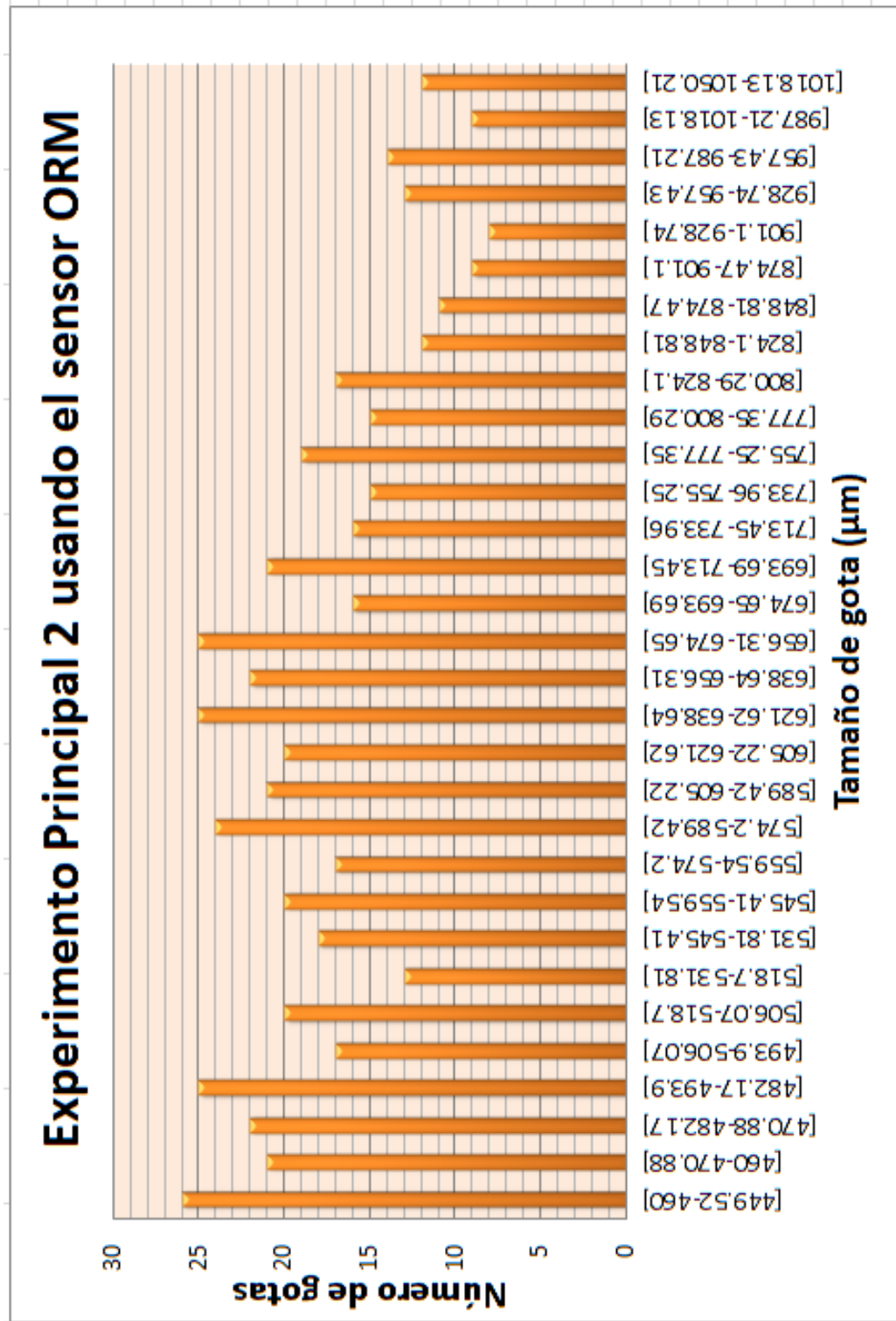
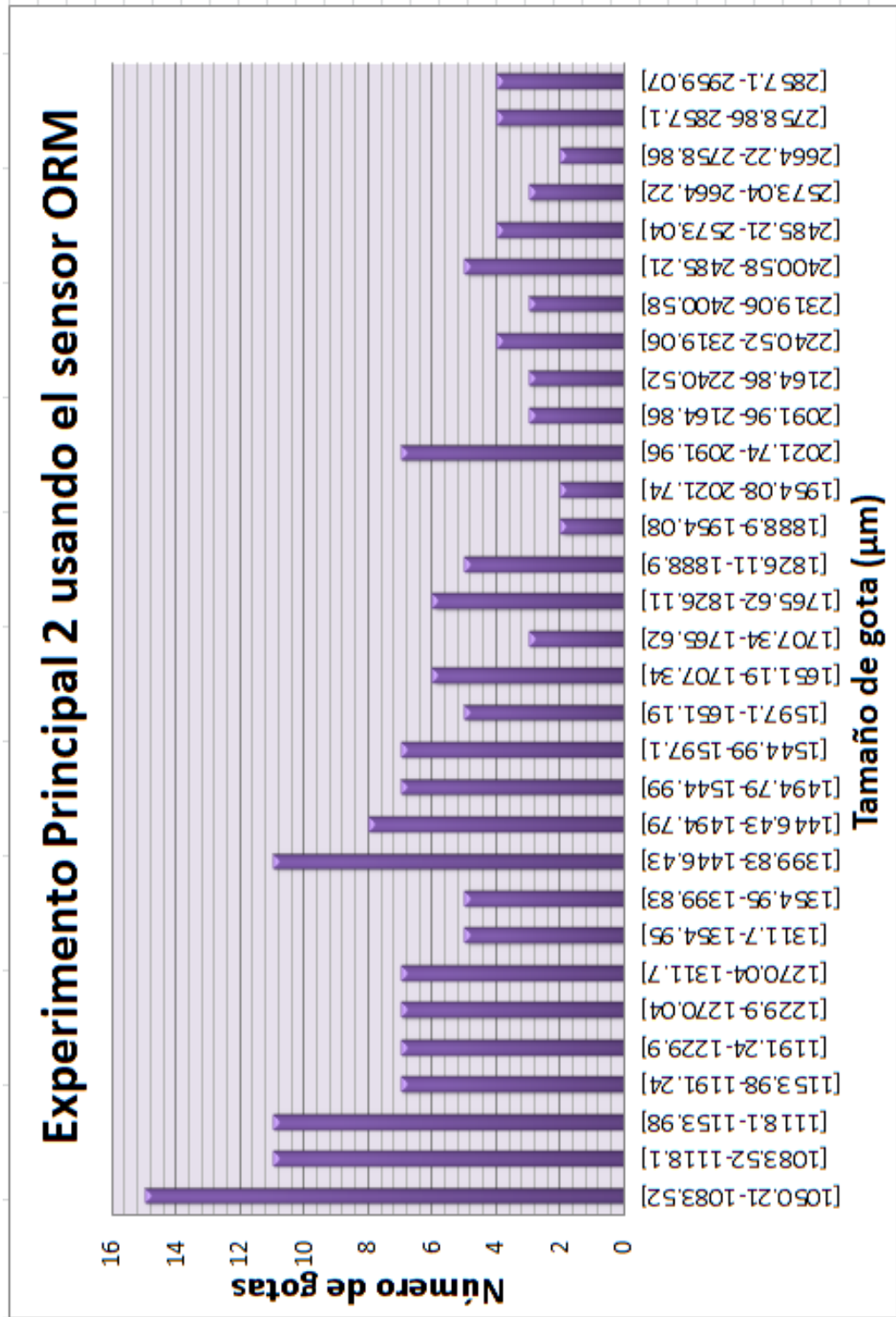


Figura 71. Gráfica 4 Número de gotas experimento Principal 2.



3- Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua son presentados desde la figura 72 a la 75.

Figura 72. Gráfica 1 Número de gotas experimento Principal 3.

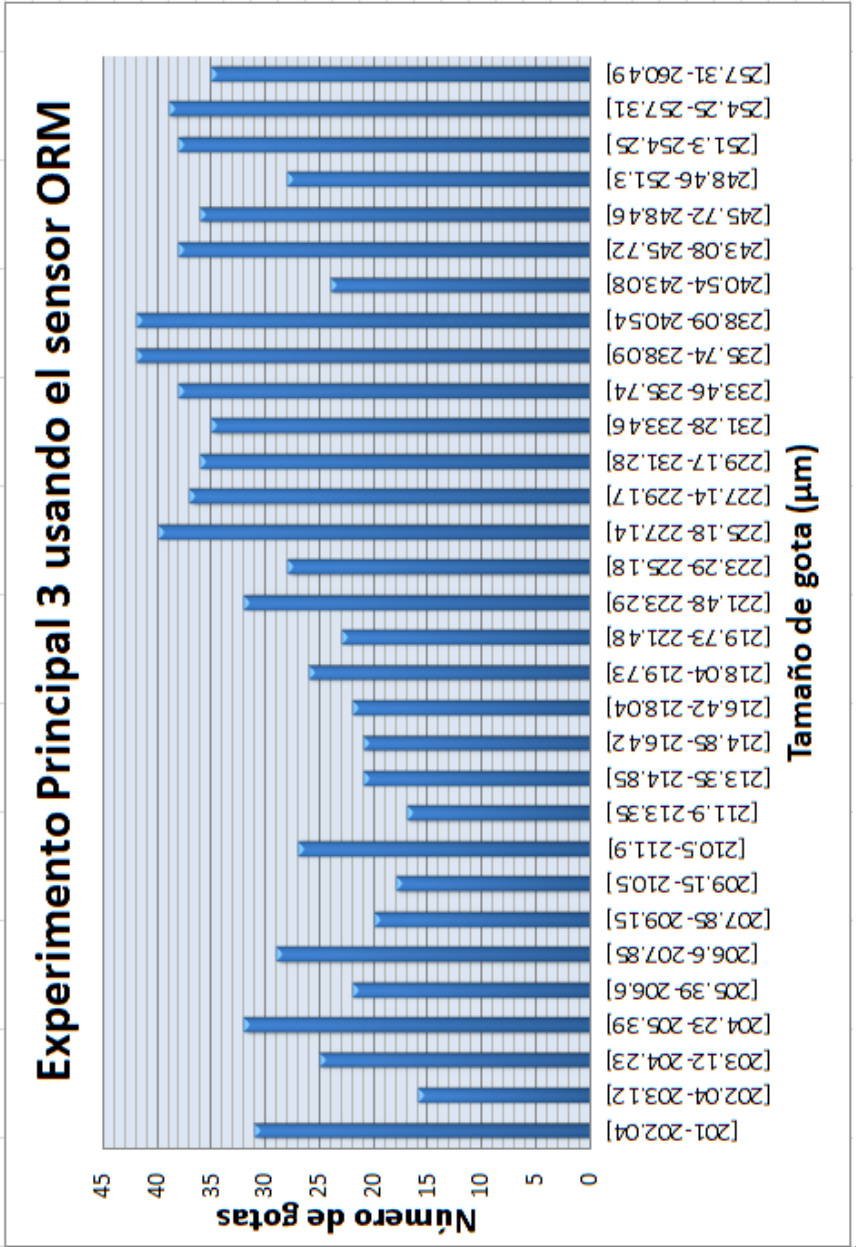


Figura 73. Gráfica 2 Número de gotas experimento Principal 3.

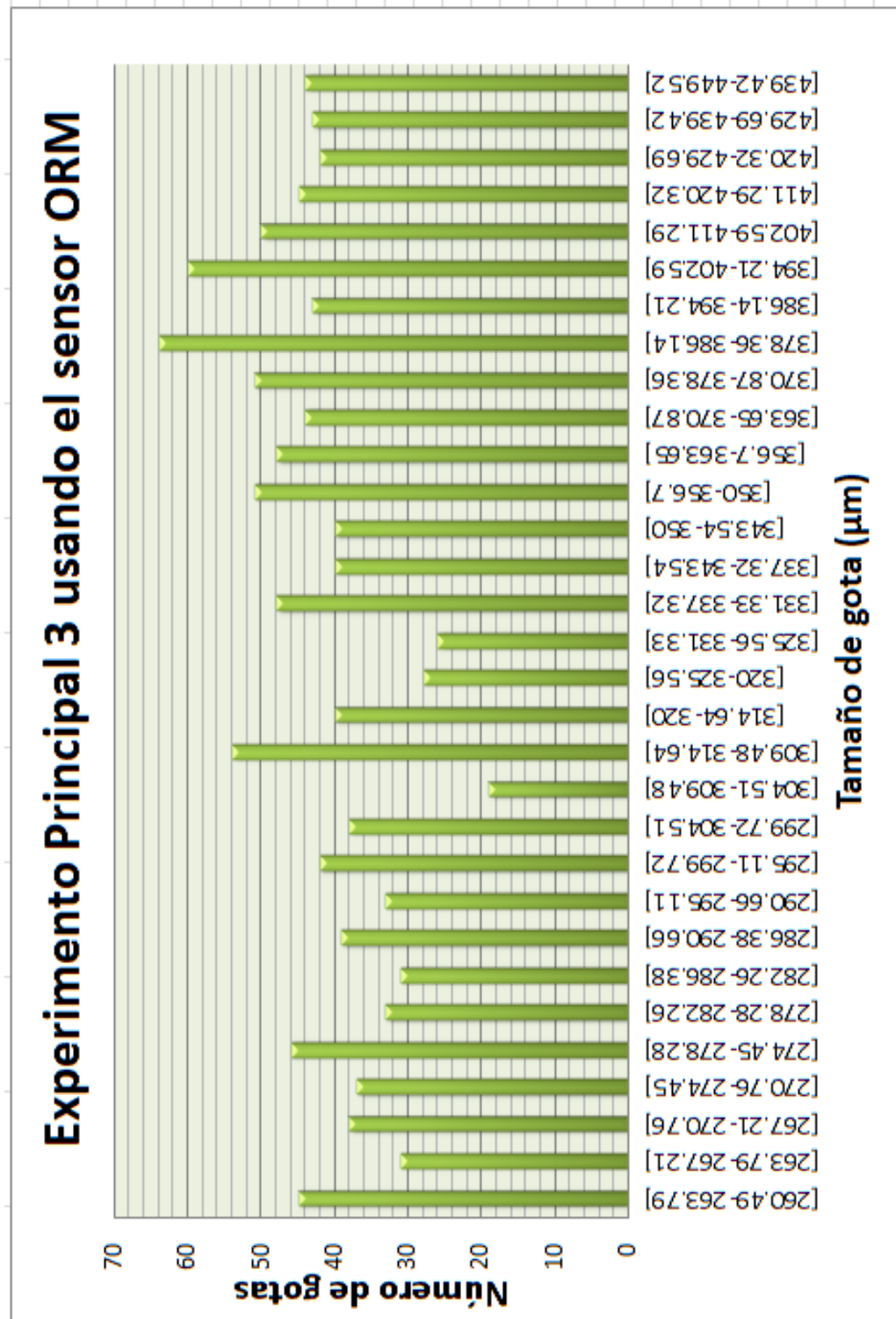


Figura 74. Gráfica 3 Número de gotas experimento Principal 3.

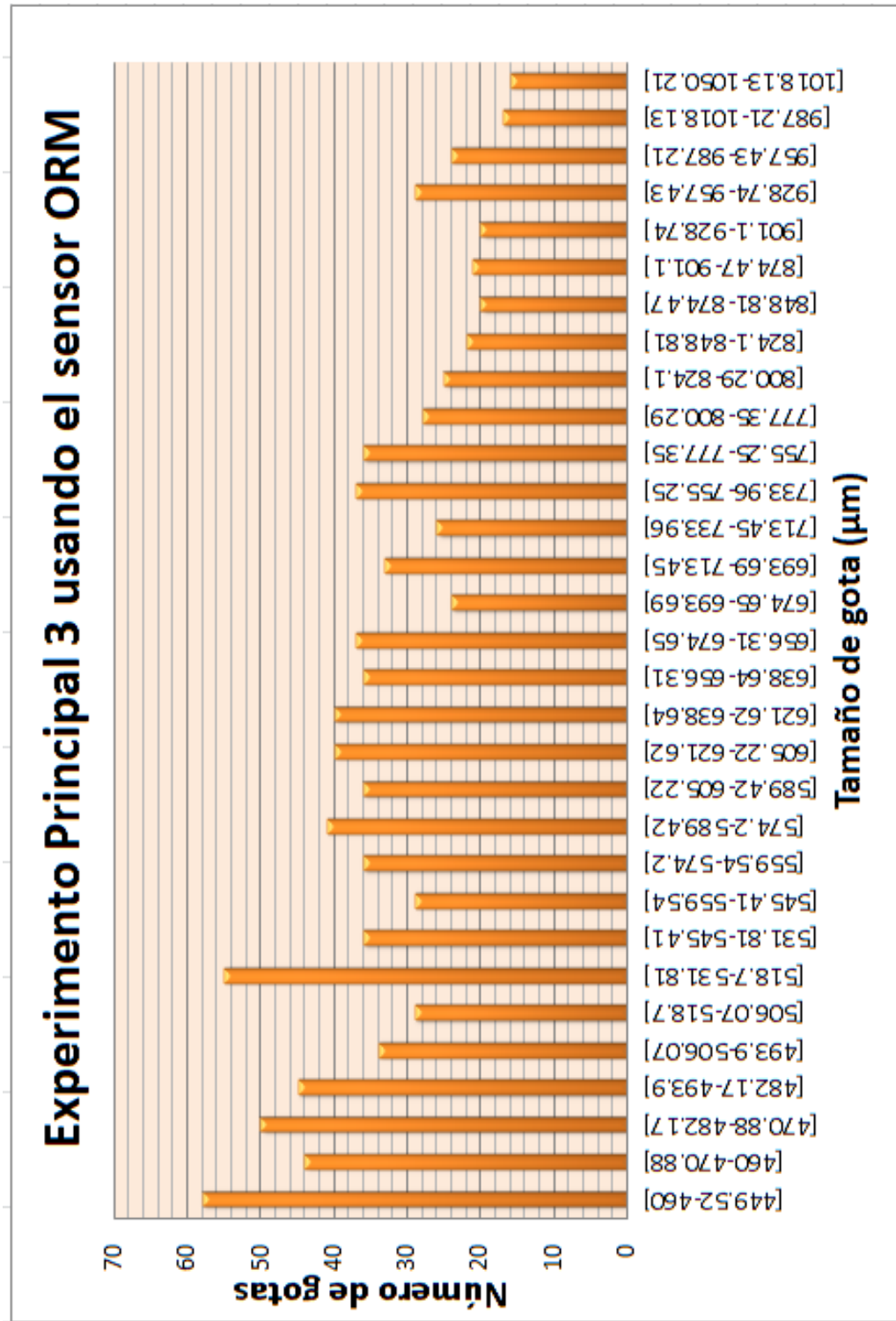
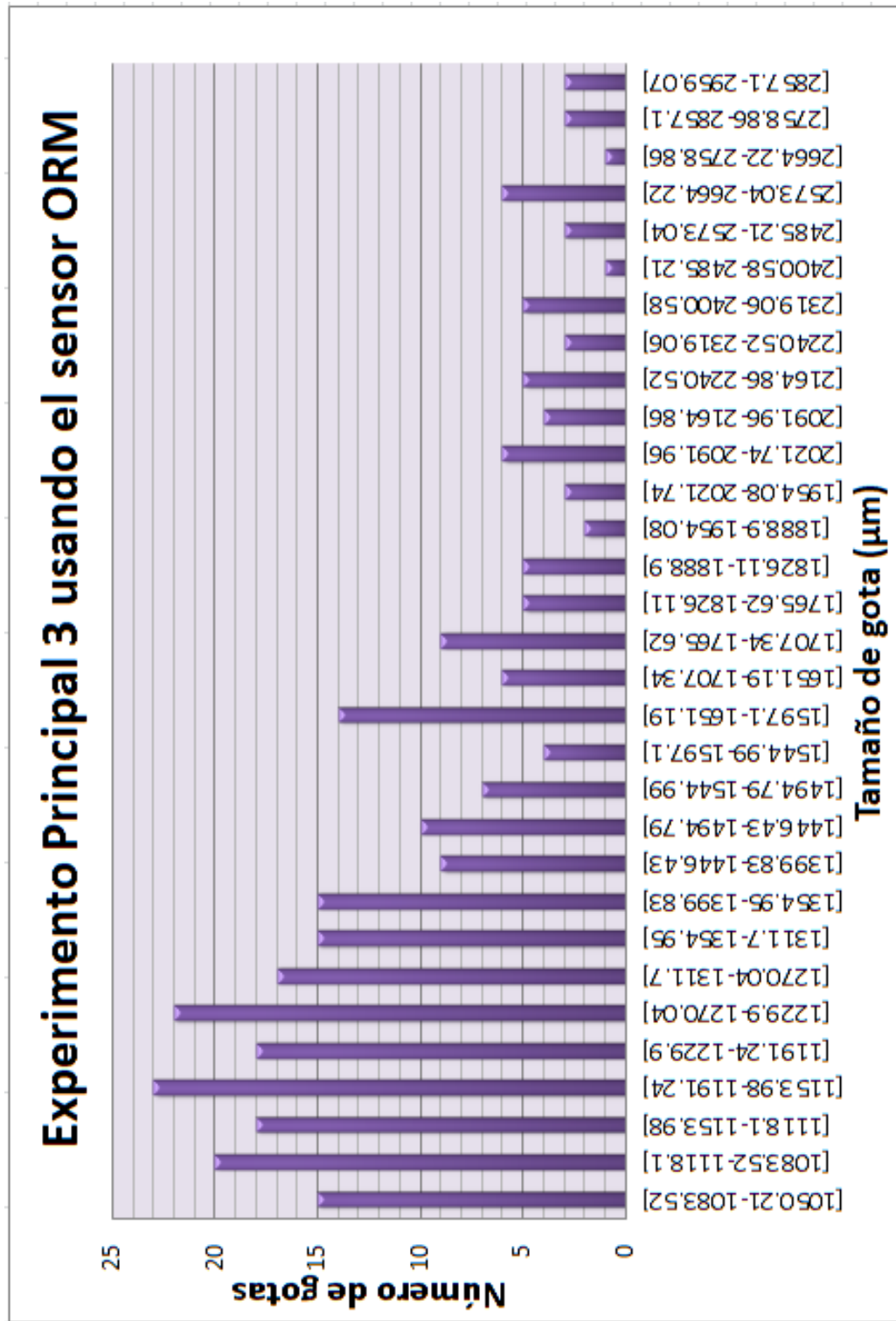


Figura 75. Gráfica 4 Número de gotas experimento Principal 3.



- 5- Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua son presentados desde la figura 76 a la 79.

Figura 76. Gráfica 1 Número de gotas experimento Principal 4.

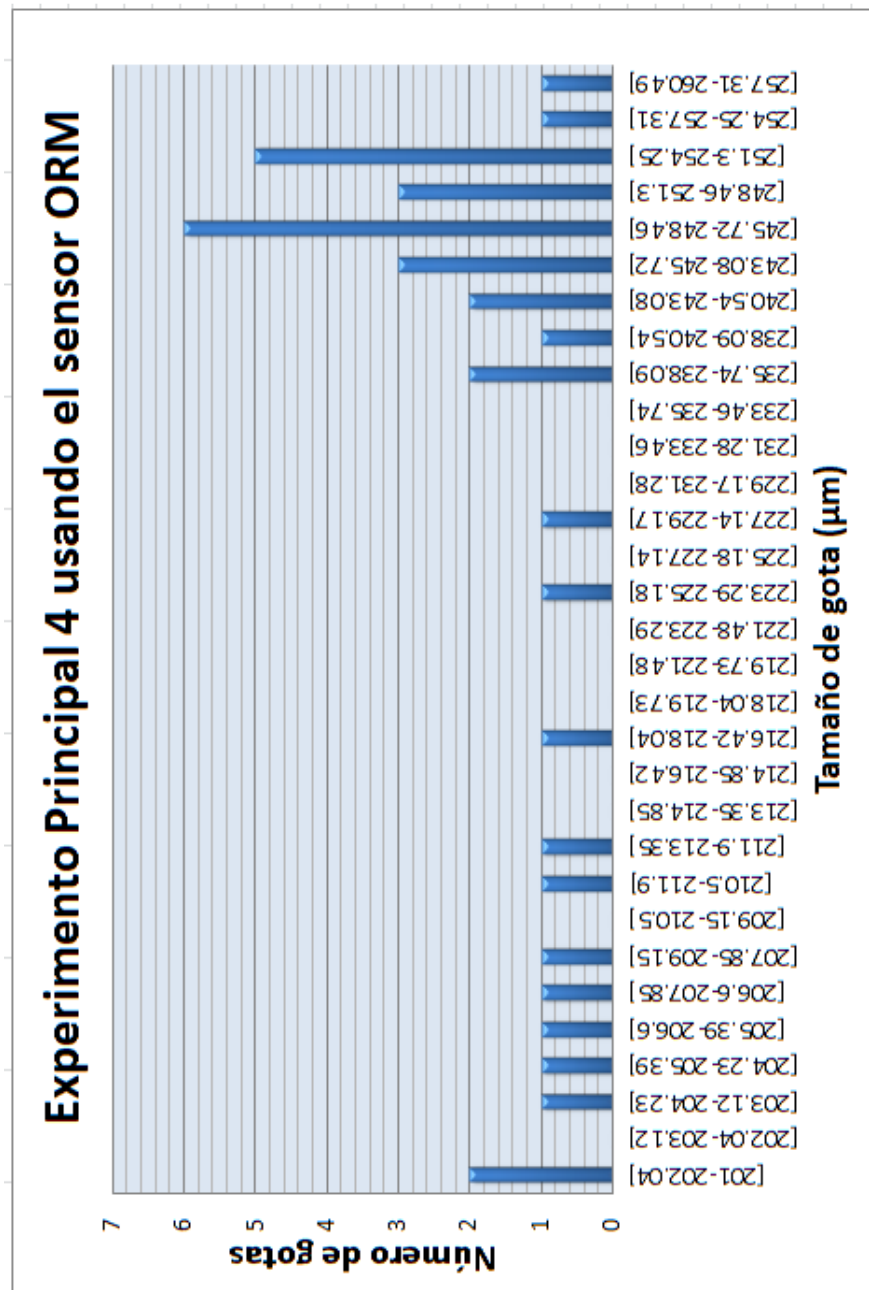


Figura 77. Gráfica 2 Número de gotas experimento Principal 4.

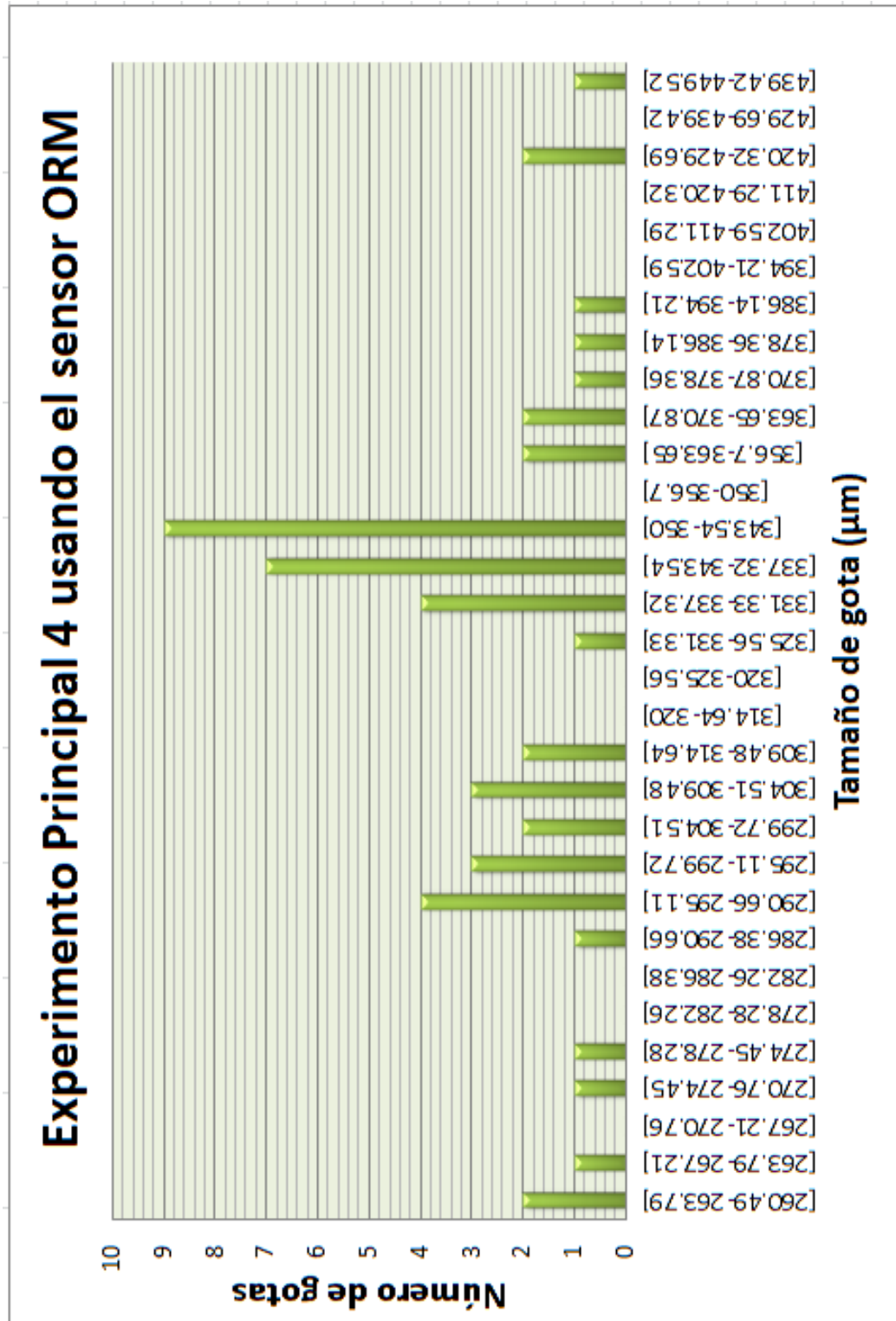


Figura 78. Gráfica 3 Número de gotas experimento Principal 4.

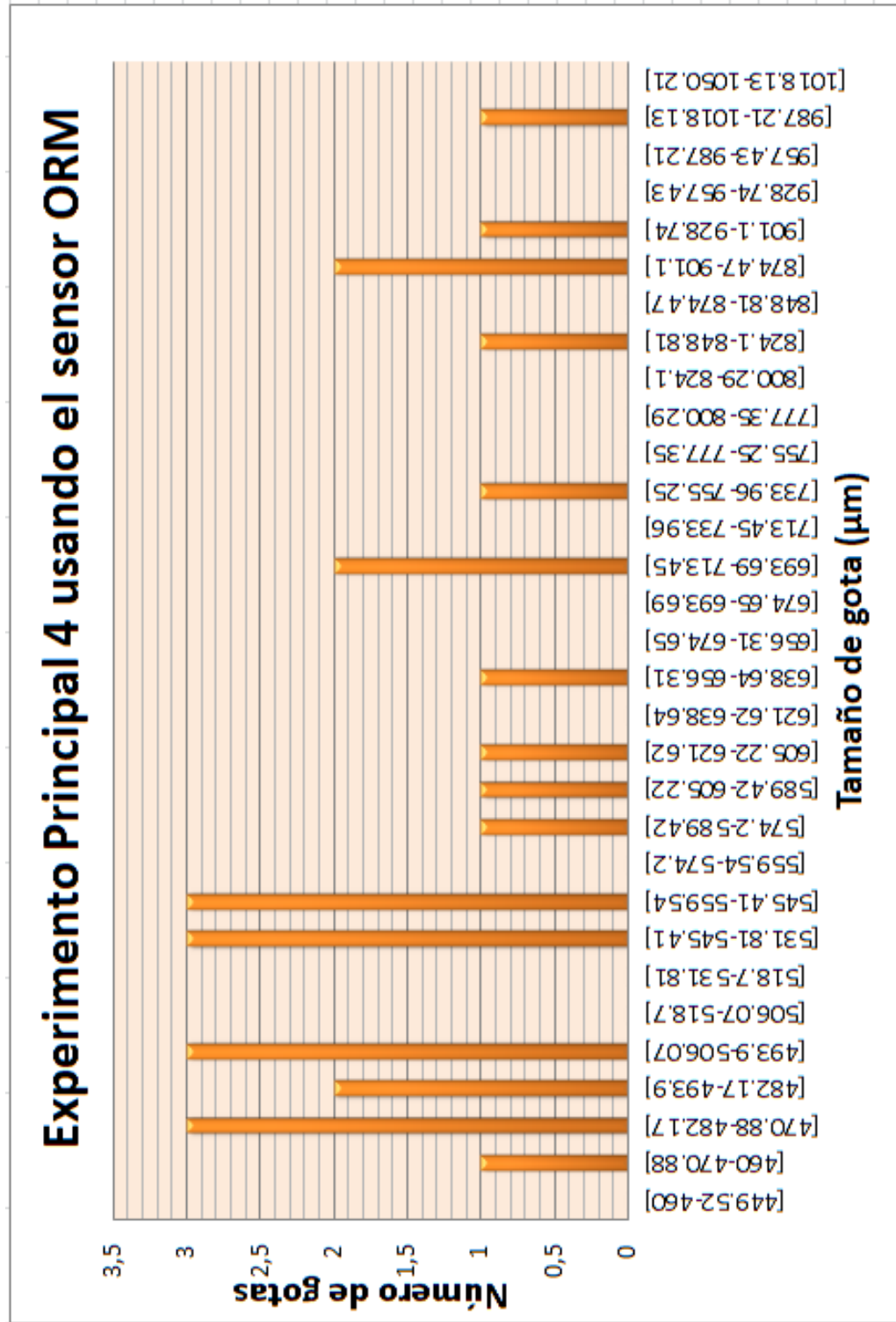
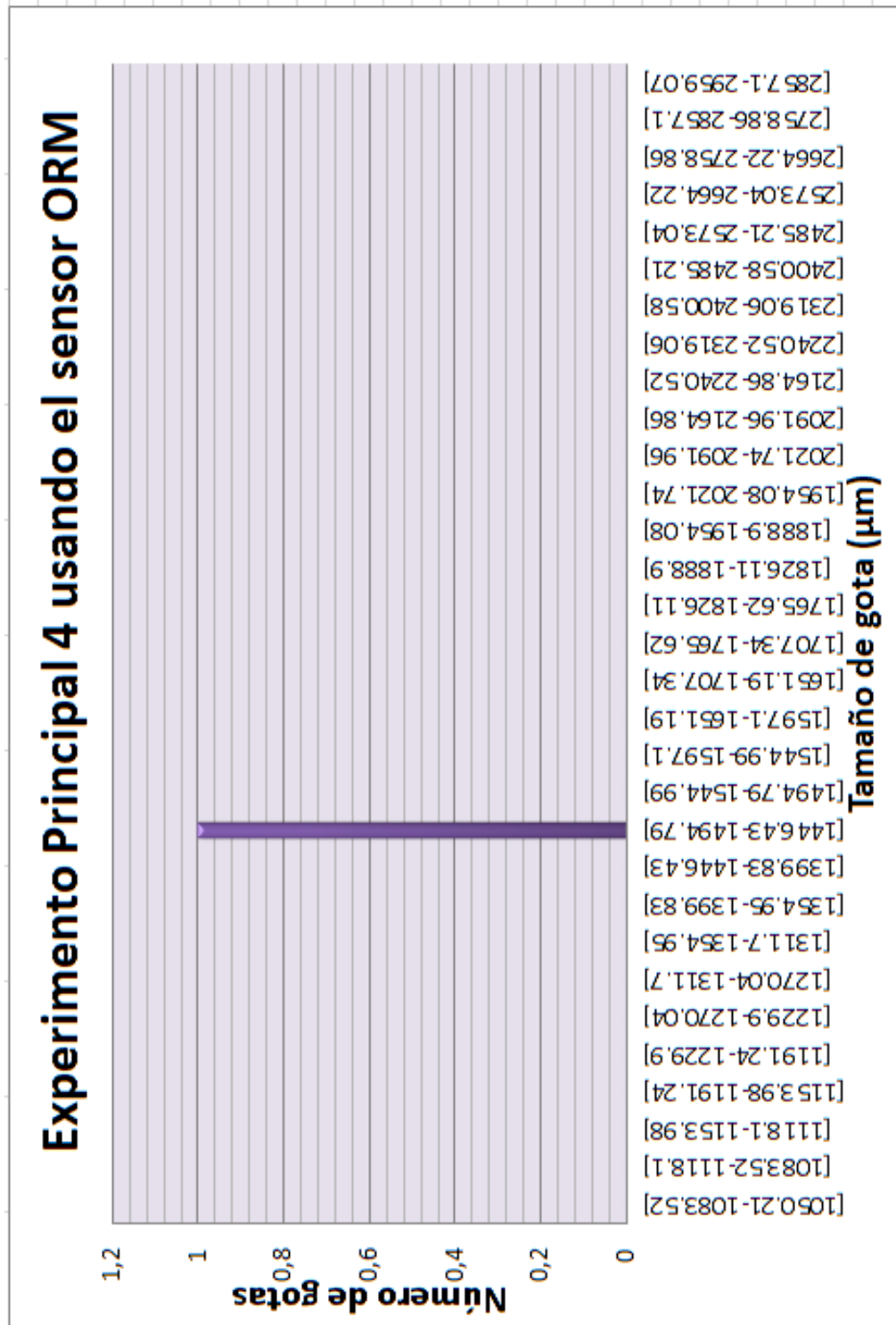


Figura 79. Gráfica 4 Número de gotas experimento Principal 4.



### **6.2.3 Análisis de resultados del experimento principal.**

Una vez obtenidos los resultados finales del experimento principal usando las técnicas de medición cámara de alta velocidad y el sensor medidor de tamaño de partículas ORM presentados en las secciones 4.4.1 y 4.4.2, se puede decir que:

- ✓ Los diámetros de gota en un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface como los simulados en este proyecto varían desde 200 $\mu\text{m}$  hasta 9000 $\mu\text{m}$  aproximadamente.
- ✓ Los diámetros de gota en un flujo multifásico aceite-agua anular como el simulado en este proyecto varían desde 200 $\mu\text{m}$  hasta 5500 $\mu\text{m}$  aproximadamente.
- ✓ A medida que se aumenta la velocidad superficial del aceite en un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface conservando el patrón de flujo se aumenta el número de gotas de aceite que se transfieren al agua.
- ✓ Medir el tamaño de gota de aceite en un flujo multifásico aceite-agua anular como el simulado en este trabajo es muy complicado debido a las altas velocidades superficiales de los fluidos dificultando la medición con el uso de la HSC y el sensor ORM.

## 7. CONCLUSIONES.

- ❖ Se calculó el número y tamaño de gotas<sup>3</sup> que se producen en un flujo multifásico aceite-agua usando los instrumentos de medición cámara de alta velocidad y sensor ORM para las siguientes fracciones de aceite-agua: agua 0.5 – aceite 0.5, agua 0.3 – aceite 0.7, agua 0.15 – aceite 0,85, donde los valores pueden oscilar entre 200 $\mu$ m y 1500 $\mu$ m.
- ❖ Se compararon los diámetros de gotas de aceite medidos por el sensor medidor de tamaño de partículas y la cámara de alta velocidad para las siguientes fracciones de aceite-agua: agua 0.5 – aceite 0.5, agua 0.3 – aceite 0.7, agua 0.15 – aceite 0,85, donde los diámetros de gotas medidos por cada instrumento fueron muy cercanos, se obtuvieron resultados coherentes y se demostró que ambas técnicas de medición son viables.
- ❖ Se determinaron los diámetros y números de gotas de aceite<sup>4</sup> que se transfieren al agua en un flujo multifásico aceite-agua estratificado con mistura en la interface y un flujo multifásico aceite-agua anular con el uso de los instrumentos de medición cámara de alta velocidad y sensor ORM, donde los tamaños de gotas de aceite que se transfieren al agua en un flujo multifásico aceite-agua estratificado con mistura en la interface y un flujo multifásico aceite-agua anular son muy variables, desde 200 $\mu$ m hasta 9000 $\mu$ m aproximadamente, por tal razón si se desea tener un diámetro promedio de gotas se debe adquirir un instrumento de medición más potente que el sensor ORM, ya que el sensor ORM solo mide gotas con un tamaño máximo de 3000 $\mu$ m. Finalmente, en un flujo multifásico estratificado con mistura en la interface se observó que a medida que se aumenta la velocidad del aceite y se sigue manteniendo el tipo de patrón, el número de gotas de aceite con un tamaño menor a 3000 $\mu$ m aumenta.

---

<sup>3</sup> Para ver los resultados obtenidos en los experimentos básicos ver las paginas 64-80.

<sup>4</sup> Para ver los resultados obtenidos en el experimento principal ver las paginas 81-110

- ❖ Se contribuyó a la misión de la Universidad Industrial de Santander, mediante una medición experimental para determinar el diámetro de las gotas de aceite en agua en un flujo multifásico en asociación con el laboratorio de Energía Térmica y Fluidos LETeF de la Universidad de Sao Paulo, afianzando la relación universidad - investigación – empresa.

## **8. RECOMENDACIONES.**

- El sensor medidor de tamaño de partículas ORM tiene por defecto la preferencia de medir gotas menores a  $500\mu\text{m}$  aproximadamente, por tal razón el tiempo de medición debe ser de varios minutos, en este caso se usaron tiempos de medición en el experimento principal de 10 minutos y así el sensor puede detectar gotas mayores a  $2000\mu\text{m}$ .
- El sensor medidor de tamaño de partículas ORM presenta problemas para medir las gotas que se producen en flujos multifásicos que usan velocidades muy altas, como el experimento principal 4.
- La calibración de la cámara de alta velocidad es muy importante, especialmente en este tipo de experimentos, donde debido a la forma curva que tienen las tuberías genera un efecto de distorsión en las gotas, lo cual puede generar un error de medición, en este experimento se usó una figura ajedrezada.
- La iluminación con lámparas es otro detalle importante para captar mejores imágenes con la cámara de alta velocidad, por tal razón, se deben colocar las lámparas en un ángulo y distancia donde los investigadores observen mejor las imágenes.

## BIBLIOGRAFÍA.

- ✓ BEDOYA RIOS, Sandra Viviana y FONTECHA CALDERON, Diana Carolina. Desarrollo de una herramienta computacional con correlaciones de flujo multifásico aplicando el factor de ajuste para la viscosidad de crudos pesados. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010.
- ✓ CARVALHO PEREIRA, CLÉBER. Estudo experimental e modelagem do escoamento estratificado ondulado aceite-água. Tesis Maestro en Ingeniería Mecánica. San Carlos: Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de San Pablo, San Carlos, Brasil, 2011.
- ✓ FLÓREZ SÁNCHEZ, Jorge Eduardo y PORRAS MEJÍA, Freddy Alberto. Determinación del patrón de flujo multifásico en tuberías de recolección de petróleo emulsionado, a partir de los datos históricos de producción apoyado en una aplicación con redes neuronales artificiales. Trabajo de grado Ingeniero de sistemas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2007.
- ✓ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, Iara. Estudo experimental e modelagem do escoamento de emulsão inversa em tubulações. Tesis Doctor en Ingeniería Mecánica. San Carlos: Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de San Pablo, San Carlos, Brasil, 2014.
- ✓ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, Iara. Estudo do fenômeno de redução de atrito em escoamento disperso óleo – água em tubulação horizontal. Tesis Maestro en Ingeniería Mecánica. San Carlos: Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de San Pablo, San Carlos, Brasil, 2009.
- ✓ M. DAMSOHN y H.-M. PRASSER. Droplet deposition measurement with high-speed camera and novel high-speed liquid film sensor with high spatial resolution. En: Nuclear Engineering and Design (March, 2011. Vol. 241, no.7, p. 2494-2499).

- ✓ MONCADA CEBALLOS, Anderson Steffann y GUERREO ARDILA, Diana Patricia. Evaluación de la caída de presión para sistemas de flujo bifásico (Líquido – Gas) en tuberías verticales. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012.
- ✓ REN LIUYI, Zhang Yimin, QIN WENQING, Bao Shenxu, WANG Peipei y YANG Congren. Investigation of condition-induced bubble size and distribution in electroflotation using high-speed camera. (January, 2014. Vol. 24, no.1, p. 7-12).
- ✓ RODRIGUEZ, O.M.H.; BANNWART, A.C. Stability Analysis of Core-Annular Flow and Neutral Stability Wave Number. AIChE Journal, v.54, n.1, p.20-31, 2008.
- ✓ RODRIGUEZ, O.M.H.; BANNWART, A.C.; CARVALHO, C.H.M. Pressure loss in core-annular flow: Modeling, experimental investigation and full-scale experiments. Journal of Petroleum Science and Engineering, v.65, n.1-2, p.67-75, 2009.
- ✓ RODRIGUEZ, O.M.H.; CASTRO, M.S. Interfacial-tension-force model for the wavy-stratified liquid–liquid flow pattern transition. International Journal of Multiphase Flow, v.58 p.114–126, 2014.
- ✓ RODRIGUEZ, O.M.H.; OLIEMANS, R.V.A. Experimental study on oil–water flow in horizontal and slightly inclined pipe. International Journal of Multiphase Flow v.32, n.3, p.323-343, 2006.
- ✓ S. Maab, S. Wollny, A. Voigt y M. Kraume. Experimental comparison of measurement techniques for drop size distributions in liquid liquid dispersions (July, 2010. Vol.50, no. 2, p. 259-269).
- ✓ SOUZA DE CASTRO MARCELO. Fenômeno de transição espacial do escoamento óleo pesado-agua no padrão estratificado. Tesis Doctor en Ingeniería Mecánica. San Carlos: Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de San Pablo, San Carlos, Brasil, 2013.
- ✓ TRALLERO, J.L. Oil-water flow patterns in horizontal pipes. 1995. (PhD) the University of Tulsa, Tulsa, 1995.

- ✓ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA.  
<http://www.sipg.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=UijaysXu9ps%3d&tabid=38&language=es-ES> Consultado: 9 de Febrero de 2015.
- ✓ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA.  
[http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta\\_Series.aspx?idModulo=3&tipoSerie=138](http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/Consulta_Series.aspx?idModulo=3&tipoSerie=138) Consultado: 9 de Febrero de 2015
- ✓ V, Arteaga e M. Johanna. Evaluación de pérdidas de presión en flujo multifásico en pozos horizontales en crudos extra pesados. Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2004.

## Anexo A. Patrones de flujo por Souza de Castro

Apêndice B

281

### APÊNDICE B - DADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresentará tabelas que detalham os pontos experimentais levantados no presente trabalho e incertezas experimentais relacionadas.

#### B.1 Levantamento de carta de fluxo e queda de pressão bifásica

Tabela B.1 - Dados de queda de pressão bifásica e padrão de escoamento.

Teste	U <sub>os</sub> [m/s]	Incerteza U <sub>os</sub> [m/s]	U <sub>ws</sub> [m/s]	Incerteza U <sub>ws</sub> [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
1	0.02	0.0001	0.03	0.000375	110.86	35	36.95	11.67	ST
2	0.02	0.0001	0.05	0.000625	118.69	35	39.56	11.67	SW
3	0.02	0.0001	0.09	0.001125	166.06	35	55.35	11.67	SW
4	0.02	0.0001	0.13	0.001625	262.27	35	87.42	11.67	SW
5	0.02	0.0001	0.16	0.002	370.10	35	123.37	11.67	SW
6	0.02	0.0001	0.2	0.0025	503.26	35	167.75	11.67	SW
7	0.02	0.0001	0.23	0.002875	595.42	35	198.47	11.67	SW&MI
8	0.02	0.0001	0.27	0.003375	466.09	35	155.36	11.67	SW&MI
9	0.02	0.0001	0.3	0.00375	388.17	35	129.39	11.67	SW&MI
10	0.02	0.0001	0.35	0.004375	78.20	35	26.07	11.67	G
11	0.02	0.0001	0.38	0.00475	131.84	35	43.95	11.67	G
12	0.02	0.0001	0.42	0.00525	188.35	35	62.78	11.67	G
13	0.02	0.0001	0.47	0.005875	-	35	-	-	G
14	0.02	0.0001	0.55	0.006875	-	35	-	-	G
15	0.02	0.0001	1	0.0125	-	35	-	-	G
16	0.02	0.0001	1.22	0.01525	2803.03	35	934.34	11.67	G
17	0.04	0.0002	0.02	0.00025	423.31	35	141.10	11.67	ST
18	0.04	0.0002	0.05	0.000625	293.52	35	97.84	11.67	SW
19	0.04	0.0002	0.09	0.001125	400.51	35	133.50	11.67	SW
20	0.04	0.0002	0.13	0.001625	505.82	35	168.61	11.67	SW
21	0.04	0.0002	0.16	0.002	598.73	35	199.58	11.67	SW
22	0.04	0.0002	0.2	0.0025	711.33	35	237.11	11.67	SW
23	0.04	0.0002	0.23	0.002875	769.78	35	256.59	11.67	SW&MI
24	0.04	0.0002	0.27	0.003375	574.84	35	191.61	11.67	SW&MI
25	0.04	0.0002	0.3	0.00375	343.17	35	114.39	11.67	SW&MI
26	0.04	0.0002	0.4	0.005	225.89	35	75.30	11.67	G
27	0.04	0.0002	0.7	0.00875	970.82	35	323.61	11.67	G

EESC-USP

Marcelo Souza de Castro

Teste	Uos [m/s]	Incerteza Uos [m/s]	Uws [m/s]	Incerteza Uws [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
28	0,04	0,0002	1	0,0125	2047,14	35	682,38	11,67	G
29	0,04	0,0002	1,22	0,01525	3010,00	35	1003,33	11,67	G
30	0,06	0,0003	0,02	0,00025	660,60	35	220,20	11,67	ST
31	0,06	0,0003	0,05	0,000625	539,59	35	179,86	11,67	SW
32	0,06	0,0003	0,09	0,001125	605,65	35	201,88	11,67	SW
33	0,06	0,0003	0,13	0,001625	727,08	35	242,36	11,67	SW
34	0,06	0,0003	0,16	0,002	804,78	35	268,26	11,67	SW
35	0,06	0,0003	0,2	0,0025	1250,95	35	416,98	11,67	SW&MI
36	0,06	0,0003	0,23	0,002875	1145,90	35	381,97	11,67	SW&MI
37	0,06	0,0003	0,27	0,003375	689,52	35	229,84	11,67	G
38	0,06	0,0003	0,4	0,005	684,76	35	228,25	11,67	G
39	0,06	0,0003	0,7	0,00875	1410,87	35	470,29	11,67	G
40	0,06	0,0003	1	0,0125	2550,43	35	850,14	11,67	G
41	0,06	0,0003	1,22	0,01525	3476,18	35	1158,73	11,67	G
42	0,08	0,0004	0,02	0,00025	1602,13	35	534,04	11,67	ST
43	0,08	0,0004	0,05	0,000625	1381,85	35	460,62	11,67	SW
44	0,08	0,0004	0,09	0,001125	1372,49	35	457,50	11,67	SW
45	0,08	0,0004	0,13	0,001625	1479,94	35	493,31	11,67	SW
46	0,08	0,0004	0,16	0,002	1530,56	35	510,19	11,67	SW
47	0,08	0,0004	0,2	0,0025	1569,34	35	523,11	11,67	SW&MI
48	0,08	0,0004	0,23	0,002875	1237,16	35	412,39	11,67	SW&MI
49	0,08	0,0004	0,27	0,003375	689,93	35	229,98	11,67	SW&MI
50	0,08	0,0004	0,4	0,005	754,05	35	251,35	11,67	P
51	0,08	0,0004	0,7	0,00875	1458,76	35	486,25	11,67	P
52	0,08	0,0004	1	0,0125	2622,56	35	874,19	11,67	G
53	0,08	0,0004	1,22	0,01525	3582,44	35	1194,15	11,67	Do/w&w
54	0,1	0,0005	0,02	0,00025	3066,69	35	1022,23	11,67	ST
55	0,1	0,0005	0,05	0,000625	2436,53	35	812,18	11,67	SW
56	0,1	0,0005	0,09	0,001125	2277,86	35	759,29	11,67	SW
57	0,1	0,0005	0,13	0,001625	2138,72	35	712,91	11,67	SW
58	0,1	0,0005	0,16	0,002	1382,00	35	460,67	11,67	SW&MI
59	0,1	0,0005	0,2	0,0025	-	35	-	-	SW&MI
60	0,1	0,0005	0,23	0,002875	965,81	35	321,94	11,67	P
61	0,1	0,0005	0,27	0,003375	679,58	35	226,53	11,67	P
62	0,1	0,0005	0,4	0,005	765,49	35	255,16	11,67	P
63	0,1	0,0005	0,7	0,00875	1417,19	35	472,40	11,67	G
64	0,1	0,0005	1	0,0125	2581,58	35	860,53	11,67	G
65	0,1	0,0005	1,22	0,01525	3444,95	35	1148,32	11,67	Do/w&w
66	0,12	0,0006	0,02	0,00025	2922,01	35	974,00	11,67	ST
67	0,12	0,0006	0,05	0,000625	2656,92	35	885,64	11,67	SW
68	0,12	0,0006	0,09	0,001125	2225,67	35	741,89	11,67	SW
69	0,12	0,0006	0,13	0,001625	2354,02	35	784,67	11,67	SW
70	0,12	0,0006	0,16	0,002	2218,90	35	739,63	11,67	SW&MI

Teste	Uos [m/s]	Incerteza Uos [m/s]	Uws [m/s]	Incerteza Uws [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
71	0,12	0,0006	0,2	0,0025	1478,56	35	492,85	11,67	SW&MI
72	0,12	0,0006	0,23	0,002875	716,29	35	238,76	11,67	P
73	0,12	0,0006	0,27	0,003375	920,59	35	306,86	11,67	P
74	0,12	0,0006	0,4	0,005	-	35	-	-	P
75	0,12	0,0006	0,7	0,00875	1538,49	35	512,83	11,67	G
76	0,12	0,0006	1	0,0125	2650,46	35	883,49	11,67	G
77	0,12	0,0006	1,22	0,01525	3651,08	35	1217,03	11,67	Do/w&w
78	0,14	0,0007	0,02	0,00025	5236,06	35	1745,35	11,67	ST
79	0,14	0,0007	0,05	0,000625	2498,79	35	832,93	11,67	SW
80	0,14	0,0007	0,09	0,001125	2638,46	35	879,49	11,67	SW
81	0,14	0,0007	0,13	0,001625	2528,51	35	842,84	11,67	SW
82	0,14	0,0007	0,16	0,002	2206,43	35	735,48	11,67	SW&MI
83	0,14	0,0007	0,2	0,0025	1819,60	35	606,53	11,67	SW&MI
84	0,14	0,0007	0,23	0,002875	1183,41	35	394,47	11,67	SW&MI
85	0,14	0,0007	0,27	0,003375	1046,56	35	348,85	11,67	G
86	0,14	0,0007	0,4	0,005	1015,78	35	338,59	11,67	G
87	0,14	0,0007	0,7	0,00875	-	35	-	-	P
88	0,14	0,0007	0,85	0,010625	2183,94	35	727,98	11,67	P
89	0,14	0,0007	1	0,0125	2806,85	35	935,62	11,67	P
90	0,14	0,0007	1,22	0,01525	3837,68	35	1279,23	11,67	P
91	0,16	0,0008	0,02	0,00025	3739,04	35	1246,35	11,67	ST
92	0,16	0,0008	0,05	0,000625	2230,90	35	743,63	11,67	SW
93	0,16	0,0008	0,09	0,001125	2454,34	35	818,11	11,67	SW
94	0,16	0,0008	0,12	0,0015	2489,12	35	829,71	11,67	SW
95	0,16	0,0008	0,16	0,002	2417,14	35	805,71	11,67	SW
96	0,16	0,0008	0,2	0,0025	1914,31	35	638,10	11,67	SW&MI
97	0,16	0,0008	0,23	0,002875	1117,69	35	372,56	11,67	G
98	0,16	0,0008	0,27	0,003375	1173,40	35	391,13	11,67	G
99	0,16	0,0008	0,33	0,004125	931,92	35	310,64	11,67	G
100	0,16	0,0008	0,4	0,005	1027,71	35	342,57	11,67	G
101	0,16	0,0008	0,55	0,006875	1368,51	35	456,17	11,67	P
102	0,16	0,0008	0,7	0,00875	1727,95	35	575,98	11,67	P
103	0,16	0,0008	1	0,0125	2876,40	35	958,80	11,67	P
104	0,16	0,0008	1,22	0,01525	3919,81	35	1306,60	11,67	P
105	0,18	0,0009	0,03	0,000375	2983,67	35	994,56	11,67	SW
106	0,18	0,0009	0,05	0,000625	2934,81	35	978,27	11,67	SW
107	0,18	0,0009	0,09	0,001125	2952,90	35	984,30	11,67	SW
108	0,18	0,0009	0,12	0,0015	2990,02	35	996,67	11,67	SW
109	0,18	0,0009	0,16	0,002	2742,03	35	914,01	11,67	SW
110	0,18	0,0009	0,2	0,0025	2155,68	35	718,56	11,67	SW&MI
111	0,18	0,0009	0,23	0,002875	1280,99	35	427,00	11,67	SW&MI
112	0,18	0,0009	0,27	0,003375	979,03	35	326,34	11,67	G
113	0,18	0,0009	0,33	0,004125	1039,56	35	346,52	11,67	G

Teste	Uos [m/s]	Incerteza Uos [m/s]	Uws [m/s]	Incerteza Uws [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
114	0,18	0,0009	0,4	0,005	1119,34	35	373,11	11,67	G
115	0,18	0,0009	0,5	0,00625	1417,31	35	472,44	11,67	P
116	0,18	0,0009	0,7	0,00875	1816,64	35	605,55	11,67	P
117	0,18	0,0009	1	0,0125	2949,11	35	983,04	11,67	P
118	0,18	0,0009	1,22	0,01525	3992,70	35	1330,90	11,67	P
119	0,2	0,001	0,03	0,000375	4045,91	35	1348,64	11,67	SW
120	0,2	0,001	0,05	0,000625	3835,37	35	1278,46	11,67	SW
121	0,2	0,001	0,09	0,001125	3601,25	35	1200,42	11,67	SW
122	0,2	0,001	0,12	0,0015	3454,61	35	1151,54	11,67	SW
123	0,2	0,001	0,16	0,002	2780,88	35	926,96	11,67	SW&MI
124	0,2	0,001	0,2	0,0025	1822,80	35	607,60	11,67	SW&MI
125	0,2	0,001	0,23	0,002875	1182,89	35	394,30	11,67	G
126	0,2	0,001	0,27	0,003375	955,25	35	318,42	11,67	G
127	0,2	0,001	0,33	0,004125	1024,34	35	341,45	11,67	G
128	0,2	0,001	0,4	0,005	-	35	-	-	G
129	0,2	0,001	0,5	0,00625	1486,95	35	495,65	11,67	P
130	0,2	0,001	0,7	0,00875	1820,63	35	606,88	11,67	P
131	0,2	0,001	1	0,0125	2918,55	35	972,85	11,67	P
132	0,2	0,001	1,22	0,01525	3915,25	35	1305,08	11,67	P
133	0,22	0,0011	0,03	0,000375	4097,04	35	1365,68	11,67	SW
134	0,22	0,0011	0,05	0,000625	4016,03	35	1338,68	11,67	SW
135	0,22	0,0011	0,09	0,001125	3899,02	35	1299,67	11,67	SW
136	0,22	0,0011	0,12	0,0015	3433,25	35	1144,42	11,67	SW
137	0,22	0,0011	0,16	0,002	2915,04	35	971,68	11,67	SW
138	0,22	0,0011	0,2	0,0025	1833,13	35	611,04	11,67	SW&MI
139	0,22	0,0011	0,23	0,002875	998,94	35	332,98	11,67	G
140	0,22	0,0011	0,27	0,003375	960,29	35	320,10	11,67	G
141	0,22	0,0011	0,33	0,004125	1023,36	35	341,12	11,67	G
142	0,22	0,0011	0,4	0,005	1170,00	35	390,00	11,67	G
143	0,22	0,0011	0,5	0,00625	1527,43	35	509,14	11,67	P
144	0,22	0,0011	0,7	0,00875	1813,31	35	604,44	11,67	P
145	0,22	0,0011	1	0,0125	2932,99	35	977,66	11,67	P
146	0,22	0,0011	1,22	0,01525	3985,99	35	1328,66	11,67	P
147	0,25	0,00125	0,03	0,000375	6269,64	35	2089,88	11,67	SW
148	0,25	0,00125	0,05	0,000625	5684,70	35	1894,90	11,67	SW
149	0,25	0,00125	0,09	0,001125	5376,20	35	1792,07	11,67	SW
150	0,25	0,00125	0,12	0,0015	4070,74	35	1356,91	11,67	SW
151	0,25	0,00125	0,16	0,002	2955,74	35	985,25	11,67	SW&MI
152	0,25	0,00125	0,2	0,0025	1682,64	35	560,88	11,67	G
153	0,25	0,00125	0,23	0,002875	1096,28	35	365,43	11,67	G
154	0,25	0,00125	0,27	0,003375	1087,90	35	362,63	11,67	G
155	0,25	0,00125	0,33	0,004125	1137,72	35	379,24	11,67	G
156	0,25	0,00125	0,4	0,005	1413,29	35	471,10	11,67	A

Teste	U <sub>os</sub> [m/s]	Incerteza U <sub>os</sub> [m/s]	U <sub>ws</sub> [m/s]	Incerteza U <sub>ws</sub> [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
157	0,25	0,00125	0,5	0,00625	1816,79	35	605,60	11,67	A
158	0,25	0,00125	0,55	0,006875	1614,18	35	538,06	11,67	G
159	0,25	0,00125	0,6	0,0075	1951,75	35	650,58	11,67	A
160	0,25	0,00125	0,7	0,00875	1902,04	35	634,01	11,67	A
161	0,25	0,00125	0,8	0,01	2300,02	35	766,67	11,67	P
162	0,25	0,00125	1	0,0125	3148,46	35	1049,49	11,67	P
163	0,25	0,00125	1,22	0,01525	4267,74	35	1422,58	11,67	P
164	0,28	0,0014	0,03	0,000375	6532,09	35	2177,36	11,67	SW
165	0,28	0,0014	0,05	0,000625	6079,30	35	2026,43	11,67	SW
166	0,28	0,0014	0,09	0,001125	6031,90	35	2010,63	11,67	SW
167	0,28	0,0014	0,12	0,0015	4534,01	35	1511,34	11,67	SW
168	0,28	0,0014	0,16	0,002	3987,68	35	1329,23	11,67	SW&MI
169	0,28	0,0014	0,2	0,0025	1954,21	35	651,40	11,67	G
170	0,28	0,0014	0,23	0,002875	1176,58	35	392,19	11,67	G
171	0,28	0,0014	0,27	0,003375	1226,49	35	408,83	11,67	G
172	0,28	0,0014	0,33	0,004125	1433,78	35	477,93	11,67	G
173	0,28	0,0014	0,4	0,005	2082,24	35	694,08	11,67	A
174	0,28	0,0014	0,5	0,00625	1673,73	35	557,91	11,67	Do/w&w
175	0,28	0,0014	0,55	0,006875	2102,59	35	700,86	11,67	A
176	0,28	0,0014	0,6	0,0075	2106,59	35	702,20	11,67	A
177	0,28	0,0014	0,7	0,00875	1950,29	35	650,10	11,67	A
178	0,28	0,0014	0,8	0,01	2359,26	35	786,42	11,67	P
179	0,28	0,0014	0,9	0,01125	2833,04	35	944,35	11,67	P
180	0,28	0,0014	1	0,0125	3331,02	35	1110,34	11,67	P
181	0,28	0,0014	1,22	0,01525	4481,48	35	2987,65	23,33	P
182	0,31	0,00155	0,03	0,000375	5262,66	35	3508,44	23,33	SW
183	0,31	0,00155	0,05	0,000625	5248,47	35	3498,98	23,33	SW
184	0,31	0,00155	0,09	0,001125	5335,14	35	3556,76	23,33	SW
185	0,31	0,00155	0,12	0,0015	4449,55	35	2966,37	23,33	SW
186	0,31	0,00155	0,16	0,002	1239,37	35	826,25	23,33	SW&MI
187	0,31	0,00155	0,2	0,0025	1208,49	35	805,66	23,33	SW&MI
188	0,31	0,00155	0,23	0,002875	1196,18	35	797,45	23,33	SW&MI
189	0,31	0,00155	0,3	0,00375	1154,74	35	769,83	23,33	G
190	0,31	0,00155	0,4	0,005	-	35	-	-	G
191	0,31	0,00155	0,45	0,005625	-	35	-	-	G
192	0,31	0,00155	0,5	0,00625	1269,23	35	846,15	23,33	G
193	0,31	0,00155	0,55	0,006875	1378,46	35	918,97	23,33	A
194	0,31	0,00155	0,65	0,008125	1281,13	35	854,09	23,33	A
195	0,31	0,00155	0,75	0,009375	1486,23	35	990,82	23,33	A
196	0,31	0,00155	0,9	0,01125	1941,41	35	1294,27	23,33	A
197	0,31	0,00155	1,05	0,013125	2385,77	35	1590,51	23,33	A
198	0,31	0,00155	1,22	0,01525	3004,60	35	2003,07	23,33	A
199	0,35	0,00175	0,04	0,0005	6236,12	35	4157,41	23,33	SW

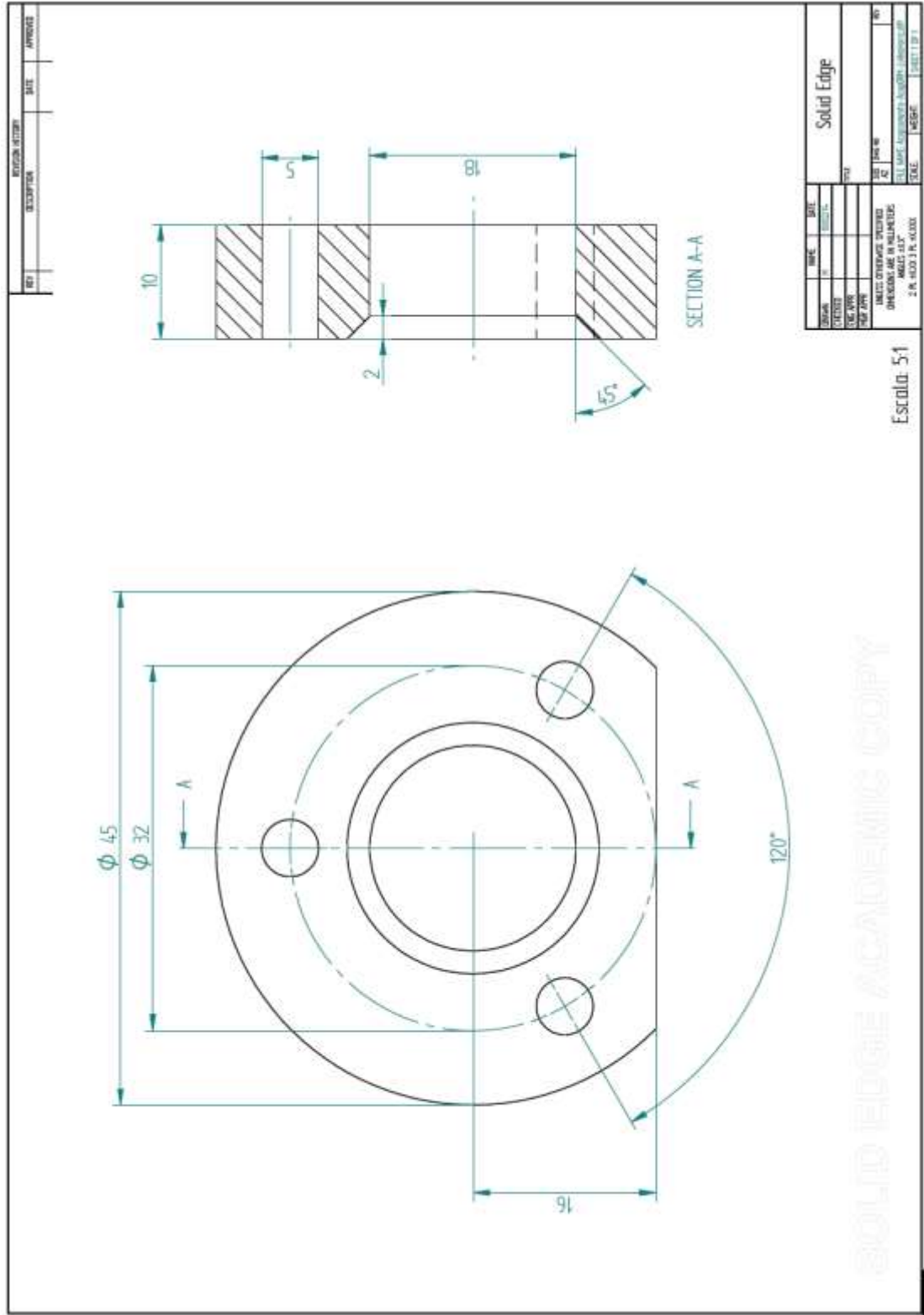
Teste	Uos [m/s]	Incerteza Uos [m/s]	Uws [m/s]	Incerteza Uws [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
200	0,35	0,00175	0,07	0,000875	5672,17	35	3781,45	23,33	SW
201	0,35	0,00175	0,09	0,001125	5533,75	35	3689,17	23,33	SW
202	0,35	0,00175	0,12	0,0015	4188,64	35	2792,43	23,33	SW
203	0,35	0,00175	0,16	0,002	-	35	-	-	G
204	0,35	0,00175	0,2	0,0025	-	35	-	-	G
205	0,35	0,00175	0,23	0,002875	-	35	-	-	G
206	0,35	0,00175	0,3	0,00375	1298,29	35	865,53	23,33	G
207	0,35	0,00175	0,4	0,005	1423,08	35	948,72	23,33	G
208	0,35	0,00175	0,45	0,005625	1513,01	35	1008,67	23,33	G
209	0,35	0,00175	0,5	0,00625	1546,96	35	1031,31	23,33	G
210	0,35	0,00175	0,55	0,006875	1485,39	35	990,26	23,33	A
211	0,35	0,00175	0,7	0,00875	1736,11	35	1157,41	23,33	A
212	0,35	0,00175	1,22	0,01525	2939,76	35	1959,84	23,33	A
213	0,4	0,002	0,04	0,0005	5714,18	35	3809,45	23,33	SW
214	0,4	0,002	0,07	0,000875	5737,59	35	3825,06	23,33	SW
215	0,4	0,002	0,09	0,001125	5756,56	35	3837,71	23,33	SW
216	0,4	0,002	0,12	0,0015	5743,47	35	3828,98	23,33	SW
217	0,4	0,002	0,16	0,002	-	35	-	-	G
218	0,4	0,002	0,2	0,0025	-	35	-	-	G
219	0,4	0,002	0,27	0,003375	1413,96	35	942,64	23,33	G
220	0,4	0,002	0,35	0,004375	1536,48	35	1024,32	23,33	G
221	0,4	0,002	0,4	0,005	1623,18	35	1082,12	23,33	G
222	0,4	0,002	0,45	0,005625	1699,85	35	1133,23	23,33	G
223	0,4	0,002	0,5	0,00625	1383,44	35	922,29	23,33	A
224	0,4	0,002	0,7	0,00875	1839,57	35	1226,38	23,33	A
225	0,4	0,002	1	0,0125	2691,11	35	1794,07	23,33	A
226	0,4	0,002	1,22	0,01525	3358,78	35	2239,19	23,33	A
227	0,45	0,00225	0,04	0,0005	6412,81	35	4275,21	23,33	SW
228	0,45	0,00225	0,07	0,000875	6128,69	35	4085,79	23,33	SW
229	0,45	0,00225	0,09	0,001125	6135,84	35	4090,56	23,33	SW
230	0,45	0,00225	0,12	0,0015	6279,35	35	4186,23	23,33	SW
231	0,45	0,00225	0,16	0,002	6297,79	35	4198,53	23,33	SW
232	0,45	0,00225	0,27	0,003375	3399,02	35	2266,01	23,33	G
233	0,45	0,00225	0,4	0,005	1851,97	35	1234,65	23,33	G
234	0,45	0,00225	0,45	0,005625	1452,42	35	968,28	23,33	A
235	0,45	0,00225	0,7	0,00875	1969,95	35	1313,30	23,33	A
236	0,45	0,00225	1,22	0,01525	3660,58	35	2440,39	23,33	A
237	0,5	0,0025	0,1	0,00125	6210,52	35	4140,35	23,33	SW
238	0,5	0,0025	0,16	0,002	6088,57	35	4059,05	23,33	G
239	0,5	0,0025	0,3	0,00375	3430,38	35	2286,92	23,33	G
240	0,5	0,0025	0,4	0,005	1922,40	35	1281,60	23,33	G
241	0,5	0,0025	0,45	0,005625	1976,41	35	1317,61	23,33	G
242	0,5	0,0025	0,52	0,0065	1825,41	35	1216,94	23,33	A

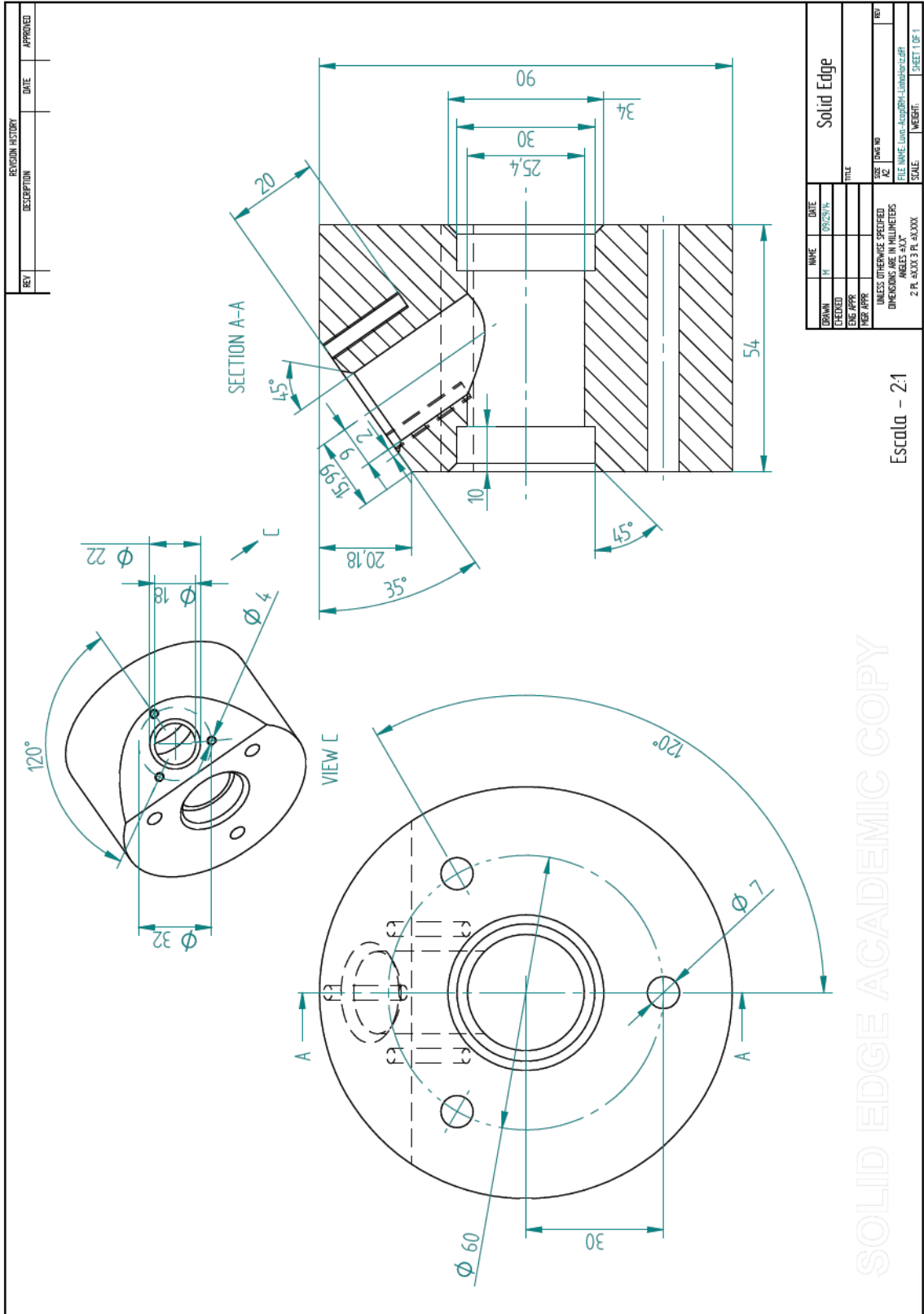
Teste	Uos [m/s]	Incerteza Uos [m/s]	Uws [m/s]	Incerteza Uws [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
243	0,5	0,0025	0,9	0,01125	3089,18	35	2059,45	23,33	A
244	0,5	0,0025	1,22	0,01525	4075,11	35	2716,74	23,33	A
245	0,6	0,003	0,12	0,0015	6862,50	35	4575,00	23,33	SW
246	0,6	0,003	0,16	0,002	5679,12	35	3786,08	23,33	G
247	0,6	0,003	0,3	0,00375	4196,08	35	2797,39	23,33	G
248	0,6	0,003	0,4	0,005	1858,05	35	1238,70	23,33	G
249	0,6	0,003	0,55	0,006875	1951,55	35	1301,03	23,33	A
250	0,6	0,003	0,9	0,01125	3142,42	35	2094,95	23,33	A
251	0,6	0,003	1,22	0,01525	4176,78	35	2784,52	23,33	A
252	0,7	0,0035	0,4	0,005	1842,07	35	1228,05	23,33	A
253	0,7	0,0035	0,6	0,0075	2365,09	35	1576,73	23,33	A
254	0,7	0,0035	0,8	0,01	2974,58	35	1983,05	23,33	A
255	0,7	0,0035	1,22	0,01525	4286,96	35	2857,97	23,33	A
256	0,8	0,004	0,3	0,00375	1429,62	35	953,08	23,33	A
257	0,8	0,004	0,6	0,0075	2699,21	35	1799,47	23,33	A
258	0,8	0,004	0,9	0,01125	3726,95	35	2484,63	23,33	A
259	0,8	0,004	1,22	0,01525	4672,78	35	3115,19	23,33	A
260	0,9	0,0045	0,3	0,00375	1903,64	35	1269,09	23,33	A
261	0,9	0,0045	0,6	0,0075	3079,53	35	2053,02	23,33	A
262	0,9	0,0045	0,9	0,01125	4022,70	35	2681,80	23,33	A
263	0,9	0,0045	1,22	0,01525	5174,75	35	3449,83	23,33	A
264	1	0,005	0,3	0,00375	2186,85	35	1457,90	23,33	A
265	1	0,005	0,6	0,0075	3291,13	35	2194,09	23,33	A
266	1	0,005	0,9	0,01125	4246,49	35	2830,99	23,33	A
267	1	0,005	1,22	0,01525	5522,46	35	3681,64	23,33	A
268	0,02	0,0001	1,5	0,015	2920,23	35	1946,82	23,33	Do/w&w
269	0,02	0,0001	2	0,02	4509,82	35	3006,55	23,33	Do/w&w
270	0,04	0,0002	1,5	0,015	2957,78	35	1971,85	23,33	Do/w&w
271	0,04	0,0002	2	0,02	4499,53	35	2999,69	23,33	Do/w&w
272	0,06	0,0003	1,5	0,015	2946,82	35	1964,55	23,33	Do/w&w
273	0,06	0,0003	2	0,02	4621,99	35	3081,33	23,33	Do/w&w
274	0,08	0,0004	1,5	0,015	4599,82	35	3066,55	23,33	Do/w&w
275	0,08	0,0004	2	0,02	4591,06	35	3060,71	23,33	Do/w&w
278	0,1	0,0005	1,5	0,015	2945,17	35	1963,45	23,33	Do/w&w
279	0,1	0,0005	2	0,02	4603,64	35	3069,09	23,33	Do/w&w
280	0,12	0,0006	1,5	0,015	2927,83	35	1951,89	23,33	P
281	0,12	0,0006	2	0,02	4859,37	35	3239,58	23,33	Do/w&w
282	0,12	0,0006	2,5	0,025	7181,07	35	4787,38	23,33	Do/w&w
283	0,14	0,0007	1,5	0,015	2978,17	35	1985,45	23,33	P
284	0,14	0,0007	2	0,02	4888,07	35	3258,71	23,33	Do/w&w
285	0,14	0,0007	2,5	0,025	7068,81	35	4712,54	23,33	Do/w&w
286	0,16	0,0008	1,5	0,015	3016,38	35	2010,92	23,33	P
287	0,16	0,0008	2	0,02	4816,47	35	3210,98	23,33	Do/w&w

Teste	Uos [m/s]	Incerteza Uos [m/s]	Uws [m/s]	Incerteza Uws [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
288	0,16	0,0008	2,5	0,025	-	35	-	-	Do/w&w
289	0,16	0,0008	3	0,03	10225,60	35	6817,07	23,33	Do/w&w
290	0,18	0,0009	1,5	0,015	3049,78	35	2033,19	23,33	P
291	0,18	0,0009	2	0,02	5007,76	35	3338,51	23,33	Do/w&w
292	0,18	0,0009	2,5	0,025	7243,93	35	4829,29	23,33	Do/w&w
293	0,18	0,0009	3	0,03	10315,00	35	6876,67	23,33	Do/w&w
294	0,2	0,001	1,5	0,015	3101,27	35	2067,51	23,33	P
295	0,2	0,001	2	0,02	5128,68	35	3419,12	23,33	Do/w&w
296	0,2	0,001	2,5	0,025	7266,68	35	4844,45	23,33	Do/w&w
297	0,2	0,001	3	0,03	10416,90	35	6944,60	23,33	Do/w&w
298	0,22	0,0011	1,5	0,015	3284,15	35	2189,43	23,33	P
299	0,22	0,0011	2	0,02	5222,02	35	3481,35	23,33	P
300	0,22	0,0011	2,5	0,025	7535,58	35	5023,72	23,33	Do/w&w
301	0,22	0,0011	3	0,03	10636,40	35	7090,93	23,33	Do/w&w
302	0,25	0,00125	1,5	0,015	3282,04	35	2188,03	23,33	Do/w&w
303	0,25	0,00125	2	0,02	5328,58	35	3552,39	23,33	P
304	0,25	0,00125	2,5	0,025	7627,51	35	5085,01	23,33	Do/w&w
305	0,25	0,00125	3	0,03	-	35	-	-	Do/w&w
306	0,28	0,0014	1,5	0,015	3332,56	35	2221,71	23,33	P
307	0,28	0,0014	2	0,02	5445,95	35	3630,63	23,33	Do/w&w
308	0,28	0,0014	2,5	0,025	7825,26	35	5216,84	23,33	Do/w&w
309	0,28	0,0014	3	0,03	10942,90	35	7295,27	23,33	Do/w&w
310	0,31	0,00155	1,5	0,015	3669,94	35	2446,63	23,33	A
311	0,31	0,00155	2	0,02	5622,12	35	3748,08	23,33	P
312	0,31	0,00155	2,5	0,025	7954,21	35	5302,81	23,33	P
313	0,31	0,00155	3	0,03	10991,40	35	7327,60	23,33	Do/w&w
314	0,35	0,00175	1,5	0,015	3609,44	35	2406,29	23,33	A
315	0,35	0,00175	2	0,02	5748,95	35	3832,63	23,33	P
316	0,35	0,00175	2,5	0,025	8057,62	35	5371,75	23,33	Do/w&w
317	0,35	0,00175	3	0,03	11424,26	35	7616,17	23,33	Do/w&w
318	0,4	0,002	1,5	0,015	3740,67	35	2493,78	23,33	A
319	0,4	0,002	2	0,02	5961,19	35	3974,13	23,33	P
320	0,4	0,002	2,5	0,025	8401,89	35	5601,26	23,33	Do/w&w
321	0,4	0,002	3	0,03	11874,30	35	7916,20	23,33	Do/w&w
322	0,5	0,0025	1,5	0,015	-	35	-	-	A
323	0,5	0,0025	2	0,02	-	35	-	-	A
324	0,5	0,0025	2,5	0,025	8840,76	35	5893,84	23,33	Do/w&w
325	0,5	0,0025	3	0,03	12114,40	35	8076,27	23,33	Do/w&w
326	0,6	0,003	1,5	0,015	4565,73	35	3043,82	23,33	Do/w&w
327	0,6	0,003	2	0,02	6841,00	35	4560,67	23,33	A
328	0,6	0,003	2,5	0,025	9346,10	35	6230,73	23,33	Do/w&w
329	0,6	0,003	3	0,03	12683,70	35	8455,80	23,33	Do/w&w
330	0,7	0,0035	1,5	0,015	4927,23	35	3284,82	23,33	A

Teste	Uos [m/s]	Incerteza Uos [m/s]	Uws [m/s]	Incerteza Uws [m/s]	Queda de pressão [Pa]	Incerteza Queda de pressão [Pa]	Gradiente de pressão [Pa/m]	Incerteza gradiente de pressão [Pa/m]	Padrão de escoamento observado
331	0,7	0,0035	2	0,02	7247,60	35	4831,73	23,33	A
332	0,7	0,0035	2,5	0,025	-	35	-	-	Do/w&w
333	0,8	0,004	1,5	0,015	5401,74	35	3601,16	23,33	A
334	0,8	0,004	2	0,02	7665,62	35	5110,41	23,33	Do/w&w
335	0,8	0,004	2,5	0,025	10396,60	35	6931,07	23,33	Do/w&w
336	0,9	0,0045	1,5	0,015	5776,45	35	3850,97	23,33	A
337	0,9	0,0045	2	0,02	-	35	-	-	A
338	1	0,005	1,5	0,015	6307,62	35	4205,08	23,33	A

Anexo B. Planos soporte ORM.





REVISION HISTORY		DATE	APPROVED
REV	DESCRIPTION		

NAME	DATE	Solid Edge	
DRAWN	BY	TITLE	
CHECKED	DATE		
ENG APPR			
MGR APPR			

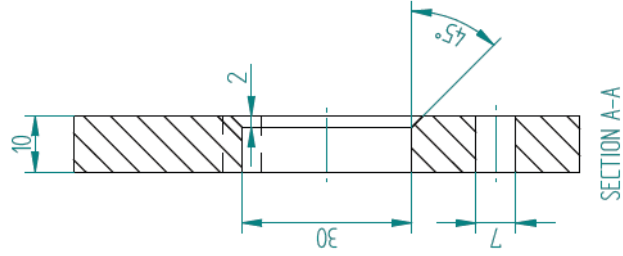
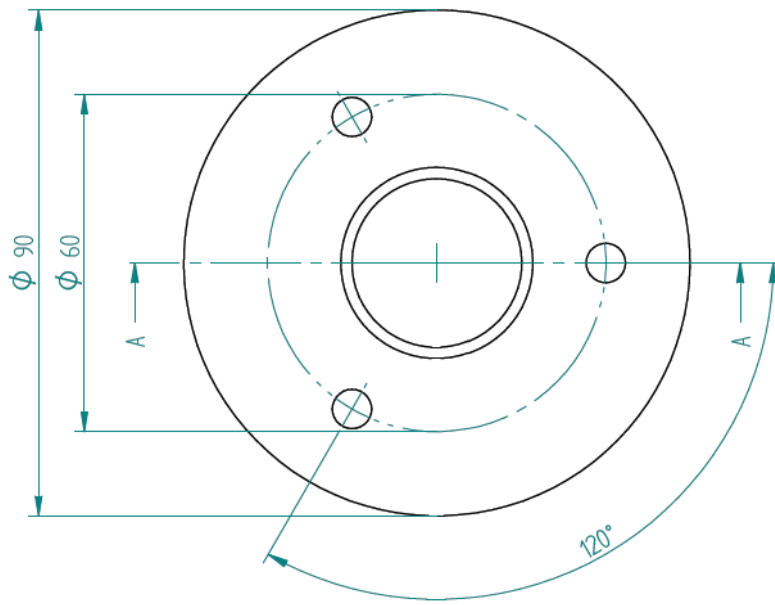
  

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGLES 30°X	DWG NO
2 PL. 30X33 PL. 30XXX	FILE NAME: L:\000001-000001-000001
SCALE	SHEET 1 OF 1

Escalera - 2:1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

REVISION HISTORY		
REV	DESCRIPTION	DATE



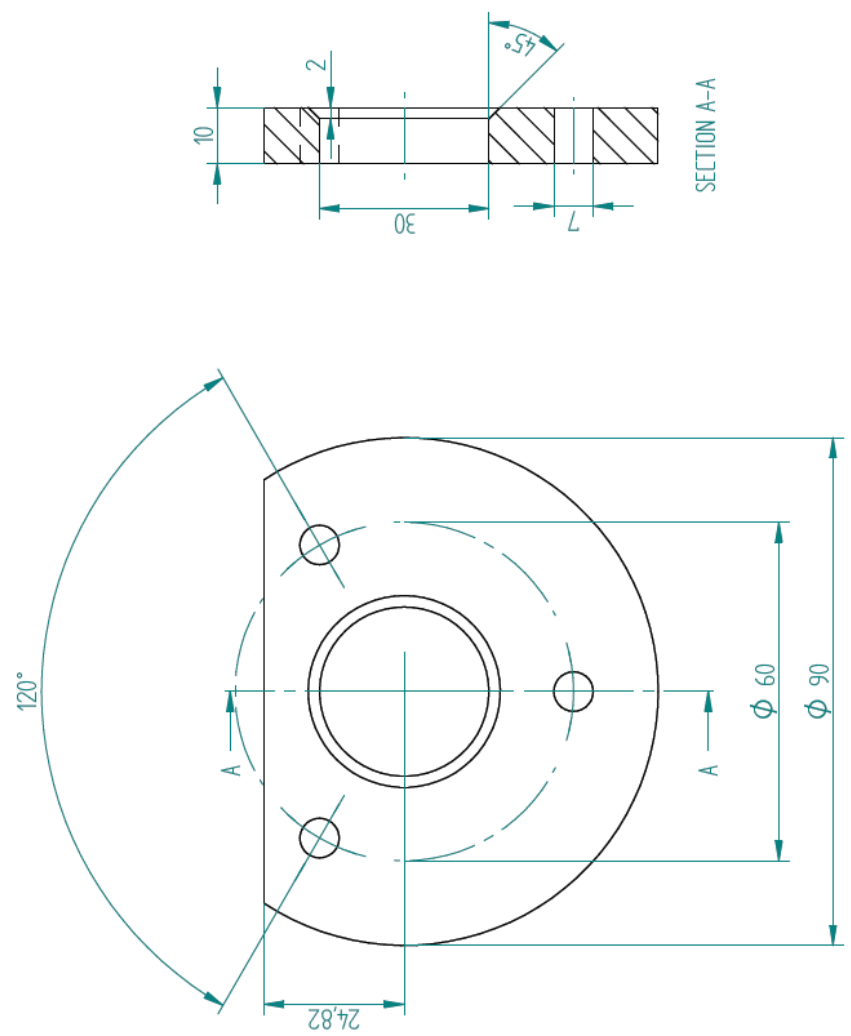
DRAWN		DATE		TITLE	
CHECKED		DATE		TITLE	
DESIGNER		DATE		TITLE	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED					
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS					
ANGLES IN DEGREES					
2 PL. 30X3 PL. 30X3X					
SCALE: 1:1					
SHEET 1 OF 1					

Solid Edge

Escala - 2:1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED



SECTION A-A

NAME	DATE	TITLE
DRAWN		
CHECKED		
ENG APPR		
MECH APPR		

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
ANGLES IN DEGREES

DATE	BY	SCALE	SHEET	OF

Solid Edge

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

### Anexo C. Datos del sensor ORM experimento principal 1.

Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,1(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua fueron:

- El total de las gotas medidas con un diámetro mayor a 201 $\mu$ m fue de 211.
- El máximo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 4.
- El mínimo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 0.
- El promedio de gotas medidas cada 2 segundos fue de 0,6.
- La gota de mayor diámetro fue aproximadamente de 1990 $\mu$ m, con un total de 1 gota.
- La gota de menor diámetro fue aproximadamente de 201.5 $\mu$ m, con un total de 1 gota.
- La gotas que más se repitieron (moda) fueron las de un diámetro 293 $\mu$ m, 312 $\mu$ m y 458 $\mu$ m con un total de 6 gotas para cada diámetro.
- El diámetro de gota que el sensor no pudo medir fue: 210, 215, 222, 226-228, 252, 353, 476, 500, 524, 550, 645-667, 745, 834-885, 965, 1035, 1140-1250, 1340-1620, 1735-1900, 2050-3000  $\mu$ m.
- El diámetro promedio de gota fue de 407 $\mu$ m.
- El tiempo aproximado de medición fue de 10 minutos y 30 segundos.

#### Anexo D. Datos del sensor ORM experimento principal 2.

Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,12(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua fueron:

- El total de las gotas medidas con un diámetro mayor a 201 $\mu$ m fue de 1836.
- El máximo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 18.
- El mínimo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 0.
- El promedio de gotas medidas cada 2 segundos fue de 6,2.
- La gota de mayor diámetro fue aproximadamente de 2950 $\mu$ m, con un total de 4 gotas.
- La gota de menor diámetro fue aproximadamente de 201.5 $\mu$ m, con un total de 6 gotas.
- La gota que más se repitió (moda) fue la de un diámetro 323 $\mu$ m, con un total de 33 gotas.
- El sensor midió todos los tamaños de gota.
- El diámetro promedio de gota fue de 531 $\mu$ m.
- El tiempo aproximado de medición fue de 12 minutos y 2 segundos.

### Anexo E. Datos del sensor ORM experimento principal 3

Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,16(m/s) para el aceite y 0,2(m/s) para el agua fueron:

- El total de las gotas medidas con un diámetro mayor a 201 $\mu$ m fue de 3512.
- El máximo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 35.
- El mínimo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 2.
- El promedio de gotas medidas cada 2 segundos fue de 12,7.
- La gota de mayor diámetro fue aproximadamente de 2950 $\mu$ m, con un total de 3 gotas.
- La gota de menor diámetro fue aproximadamente de 201.5 $\mu$ m, con un total de 31 gotas.
- La gota que más se repitió (moda) fue la de un diámetro de 382 $\mu$ m con un total de 64 gotas.
- El sensor midió todos los tamaños de gota.
- El diámetro promedio de gota fue de 493 $\mu$ m.
- El tiempo aproximado de medición fue de 11 minutos y 18 segundos.

## Anexo F. Datos del sensor ORM experimento principal 4.

Los resultados obtenidos con el ORM para un flujo multifásico aceite-agua con mistura en la interface y velocidades superficiales de 0,5(m/s) para el aceite y 1,5(m/s) para el agua fueron:

- El total de las gotas medidas con un diámetro mayor a 201 $\mu$ m fue de 115.
- El máximo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 4.
- El mínimo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 0.
- El promedio de gotas medidas cada 2 segundos fue de 0,9.
- La gota de mayor diámetro fue aproximadamente de 1470 $\mu$ m, con un total de 1 gota.
- La gota de menor diámetro fue aproximadamente de 201.5 $\mu$ m, con un total de 2 gotas.
- La gota que más se repitió (moda) fue la de un diámetro de 348 $\mu$ m con un total de 9 gotas.
- El diámetro de gota que el sensor no pudo medir fue: 202,5, 210, 214-215, 219-222, 226, 230-234, 268, 280-284, 318-323, 353, 398-416, 435, 458, 512-524, 565, 630, 667-682, 725, 764-810, 860, 940-965, 1035-1430, 1520-3000  $\mu$ m.
- El diámetro promedio de gota fue de 379 $\mu$ m.
- El tiempo aproximado de medición fue de 10 minutos y 2 segundos.

## Anexo G. Fundamentos del flujo multifásico

En el caso de flujo monofásico, solo gas o solo líquido, las caídas de presión pueden ser calculadas fácilmente si se conocen características de la tubería tales como longitud y rugosidad, pero la mayoría de pozos productores de gas o de aceite operan bajo condiciones multifase. Normalmente hay algún gas libre producido en pozos de aceite, y la mayoría de pozos de gas producirán agua o condensados hidrocarburos.

La presencia de líquido y gas en una tubería complica enormemente los cálculos de pérdidas de presión, ya que un cambio de presión provoca cambios de fase en los fluidos, por ende en las densidades, velocidades, volúmenes de cada fase y propiedades del fluido, también ocurren cambios en la temperatura, pero este no es un problema en la predicción del comportamiento del pozo si la temperatura del pozo permanece constante

El flujo multifásico se define como el flujo simultáneo de dos o más fases (en estado líquido, sólido o gaseoso) en una tubería. En la industria del petróleo, el flujo multifásico se presenta en tuberías de superficie y en los pozos de producción de gas y aceite (la mayoría de pozos que producen líquidos producen algo de gas y viceversa).

Todos los intentos realizados para obtener una solución general para el problema del flujo multifásico han caído en el vacío, aun así se ha observado una asociación natural, es decir, para cada patrón hay un comportamiento similar, esto hace que el problema sea algo más fácil, se analiza cada patrón por separado. De esta manera, el método lógico indica primero que hay que predecir el patrón de flujo en la tubería, y una vez determinado se desarrolla un modelo por separado el cual prediga las características del flujo, como caída de presión, hold up del líquido y el coeficiente de transferencia de calor.

## 1.1 Ecuación general de la energía.

La base teórica para las principales ecuaciones de flujo de fluidos es la ecuación general de energía, una expresión para el balance o conservación de energía entre dos puntos de un sistema. Como se observa en la ecuación 1-1.

$$U'_1 + P_1 * V_1 + \frac{m * v_1^2}{2} + \frac{m * g * z_1}{1} + q' + Ws' = U'_2 + P_2 * V_2 + \frac{m * v_2^2}{2} + \frac{m * g * z_2}{1} \quad (1-1)$$

Donde

$U'$  = energía interna,

$PV$  = Energía de expansión o compresión,

$\frac{m * v^2}{2}$  = Energía cinética,

$\frac{m * g * z}{1}$  = Energía potencial,

$q'$  = Energía de calor agregado al fluido,

$Ws'$  = trabajo hecho sobre el fluido por los alrededores.

Usando principios termodinámicos se modifica la ecuación de energía desarrollada, a la forma de ecuación de gradiente de presión, finalmente quedando así:

$$\frac{d_p}{d_l} = \frac{g}{g_l} * \rho * \text{sen } \theta + \frac{\rho v dv}{dl} + \frac{f \rho v^2}{2dl} \quad (1-2)$$

La ecuación 1-2 es aplicable a cualquier fluido y a cualquier ángulo de inclinación, donde  $f$  es el factor de fricción y está en función del número de Reynolds y la rugosidad de la tubería, esta relación se muestra en el diagrama de Moody.

A manera general esta ecuación se puede expresar así:

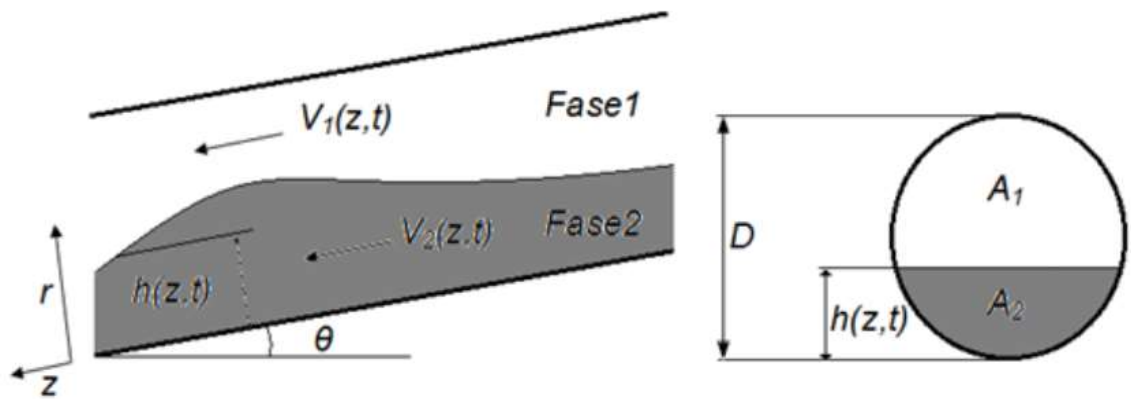
$$\frac{d_p}{d_l} = \left(\frac{d_p}{d_l}\right)_{el} + \left(\frac{d_p}{d_l}\right)_f + \left(\frac{d_p}{d_l}\right)_{acc} \quad (1-3)$$

La ecuación 1-3 es usualmente adaptada para flujo multifásico asumiendo que la mezcla gas – líquidos puede ser considerada como homogénea sobre un volumen finito de tubería.

## 1.2 Parámetros básicos del flujo multifásico.

Considerando un flujo aceite-agua, donde los fluidos fluyen simultáneamente, algunos parámetros básicos y ampliamente difundidos en la literatura pueden ser deducidos y son presentados en la Figura G1.

Figura 80. Esquema del flujo multifásico de fases separadas.



Fuente: Souza de Castro.

Los más básicos son la área de la sección transversal del tubo,  $A$ , y los flujos volumétricos de cada una de las fases, aceite y agua,  $Q_o$  y  $Q_w$  respectivamente

### 1.2.1 Velocidades Superficiales

Se define la velocidad superficial de determinada fase, como la velocidad a la que viajaría ésta si fluyera sola a través de toda el área de flujo de la tubería. Por lo tanto:

$$V_{SL} = \frac{Q_l}{\left(\pi \frac{D^2}{4}\right)} \quad (1-4)$$

$V_{SL}$  = Velocidad superficial Líquido.

$D$  = Diámetro.

$Q_l$  = Flujo del líquido por la tubería.

### 1.2.2 Velocidad de la mezcla.

La velocidad de la mezcla se define como la suma algebraica de la velocidad superficial de cada líquido:

$$V_M = V_{SO} + V_{SW} \quad (1-5)$$

$V_M$  = Velocidad de la mezcla

$V_{SO}$  = Velocidad superficial del aceite.

$V_{SW}$  = Velocidad superficial del agua.

### 1.2.3 Holdup Del líquido Sin Deslizamiento.

El Holdup del líquido sin deslizamiento o fracción volumétrica de inyección,  $\lambda_o$  y  $\lambda_w$ , se define en términos de las tasas volumétricas bajo determinadas condiciones de presión y temperatura de flujo. Se considera que no hay deslizamiento entre las fases, cuando las fases tienen la misma velocidad real. Las ecuaciones se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3.  $\lambda_w$   $\lambda_o$  para el Holdup del líquido sin deslizamiento.

Fase del agua	Fase del aceite	
$\lambda_w = \frac{Q_w}{Q_w + Q_o}$	$\lambda_o = \frac{Q_o}{Q_o + Q_w}$	$\lambda_w + \lambda_o = 1$
$\lambda_w = \frac{V_{SW}}{V_{SW} + V_{SO}} = \frac{V_{SW}}{V_M}$	$\lambda_o = \frac{V_{SO}}{V_{SO} + V_{SW}} = \frac{V_{SO}}{V_M}$	

Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

#### 1.2.4 Hold Up del líquido.

El Holdup de los líquidos se define como la relación entre el volumen de un segmento de tubería ocupado por el aceite y el volumen total de líquido de ese segmento. Este valor varía entre cero y uno, por lo que, la diferencia de 1 menos el Holdup del aceite ( $\mathcal{E}_o$ ) equivaldrá al Holdup del agua ( $\mathcal{E}_w$ ).

Físicamente, el Holdup del líquido se mide cerrando dos válvulas cercanas y midiendo la cantidad de líquido retenido. Dependiendo del método, se propone una ecuación diferente para su evolución y generalmente depende del patrón de flujo y de la posición de la tubería.

$$\mathcal{E}_o = \frac{A_o * \delta L}{A * \delta L} = \frac{A_o}{A_L} \quad ; \quad \mathcal{E}_w = \frac{A_w * \delta L}{A * \delta L} = \frac{A_w}{A_L} \quad (1-6)$$

### 1.2.5 Velocidades Reales.

La velocidad real de la fase líquida ( $V_L$ ) es aquella que considera el deslizamiento entre las fases:

$$V_L = \frac{Q_L}{A^* \varepsilon_L} \quad ; \quad V_O = \frac{Q_o}{A^* \varepsilon_o} \quad ; \quad V_W = \frac{Q_w}{A^* \varepsilon_w} \quad (1-7)$$

### 1.2.6 Holdup Ratio o Deslizamiento.

Diferencias en la densidad y/o viscosidad causan una importante característica en los flujos multifásicos: El deslizamiento S. Como descrito por Oliemans (1986), el Holdup Ratio o deslizamiento puede ser definido como la razón de las fracciones volumétricas in situ ( $\varepsilon_w/\varepsilon_o$ ) sobre la razón de las fracciones volumétricas de inyección ( $\lambda_w / \lambda_c$ ), el que es equivalente a la razón de las velocidades de las fases in situ, o sea:

$$S = \frac{\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_o}}{\frac{\lambda_w}{\lambda_c}} = \frac{V_o}{V_w} \quad (1-8)$$

Cuando el deslizamiento S es mayor a 1, el agua está acumulándose en el tubo y el aceite está fluyendo más rápido. Cuando el deslizamiento es menor que a 1, el aceite está acumulándose en el tubo y el agua está fluyendo más rápido.

Los siguientes son modelos empíricos desarrollados para la estimación del Holdup en flujo horizontal:

### 1.2.7 Correlación De Beggs & Brill.

Se menciona aquí la correlación de Beggs y Brill, ya que ésta se puede usar en tubería horizontal y al mismo tiempo puede ajustarse para tuberías inclinadas.

Dependiendo del patrón de flujo, Beggs y Brill proponen las siguientes correlaciones:

Tabla 4. Correlaciones para el cálculo del Holdup, según Beggs & Brill.

Patrón de flujo	Correlación
<b>Segregado</b>	$\varepsilon_L(0) = \frac{0.98\lambda^{0.484}}{N_{FR}^{0.0868}}$
<b>Transición</b>	$\varepsilon_L(0) = \frac{0.98\lambda^{0.4846}}{N_{FR}^{0.0868}} * \frac{(L3 - N_{FR})}{(L3 - L2)} + \frac{0.845 * \lambda^{0.5351}}{N_{FR}^{0.8609}} * \left(1 - \frac{(L3 - N_{FR})}{(L3 - L2)}\right)$
<b>Intermitente</b>	$\varepsilon_L(0) = \frac{0.845\lambda^{0.5351}}{N_{FR}^{0.0173}}$
<b>Distribuido</b>	$\varepsilon_L(0) = \frac{1.065\lambda^{0.5824}}{N_{FR}^{0.0609}}$

Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

### 1.2.8 Correlación De Lockhart & Martinelli Y Sus Modificaciones.

En el año de 1949, se presentó una correlación empírica para la fracción volumétrica promedio in situ de la fase líquida,  $E_L$ , como función de X, definido así:

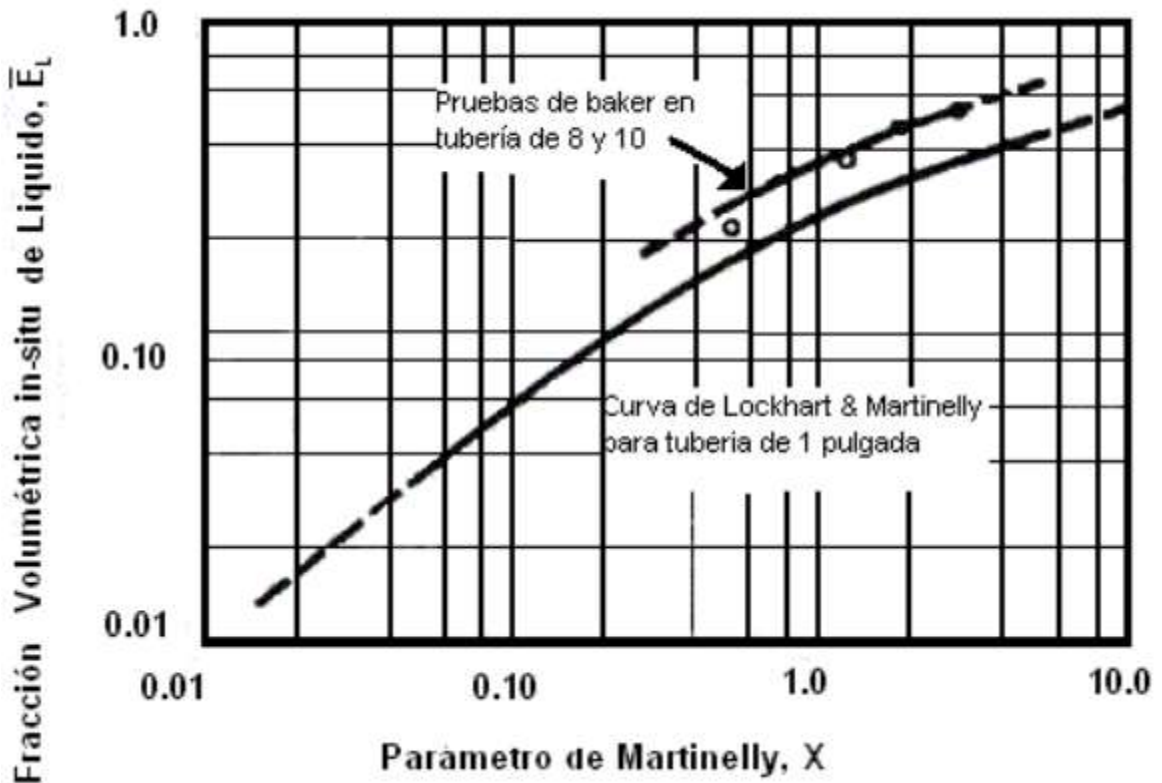
$$X = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{SL}}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{SG}}} \quad (1-9)$$

Donde  $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{SL}$  es el gradiente de presión que tendría lugar si el líquido estuviera fluyendo solo a velocidad superficial, y  $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{SG}$  es el gradiente de presión que tendría lugar si el gas estuviera fluyendo solo, a velocidad superficial. X puede ser también notada de la forma:

$$X = \left(\frac{V_{SL}}{V_{SG}}\right)^{7/8} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)^{3/8} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{1/8} \quad (1-10)$$

En esta ecuación X es una razón de velocidades dependiente de las propiedades de los fluidos. Esta correlación fue realizada con datos para tubería de 1 pulgada, pero Baker comparó estos datos con los de tuberías de diámetros mayores y encontró que los valores de Holdup eran mayores.

Figura 81. Correlación de Lockhart & Martinelli y las observaciones de Becker.



Fuente: Flórez Jorge y Porrás Alberto.

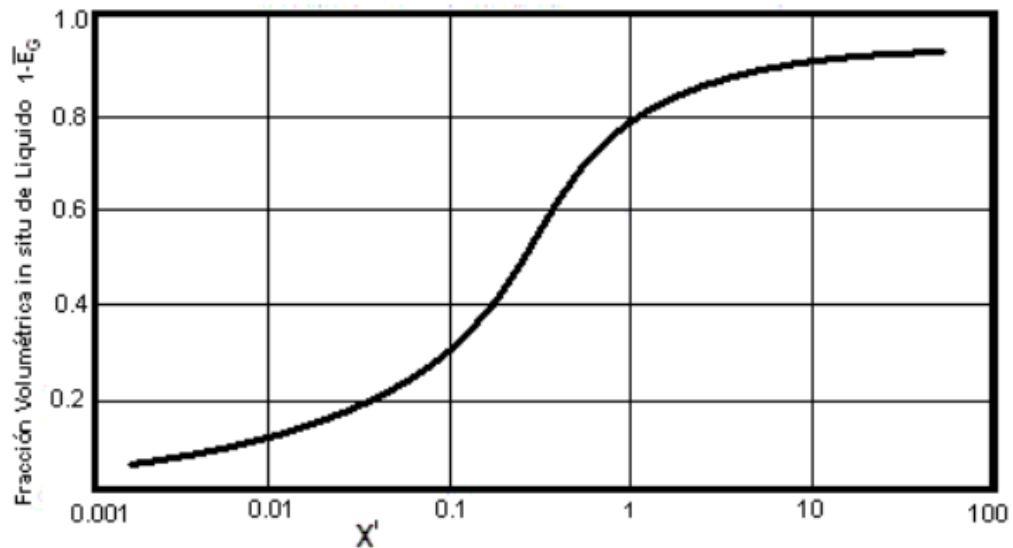
### 1.2.9 Correlación De Hughark & Pressburg.

En el año de 1962 se desarrolló quizá la mejor correlación general para el holdup de mezclas Gas-Líquido, cubriendo un amplio rango de propiedades físicas y diámetros, inicialmente desarrollada para flujo en tubería vertical, demostró después ser útil también para flujo horizontal. Ellos desarrollaron una relación entre  $E_G$ , la fracción volumétrica in situ promedio por unidad de volumen de la fase gaseosa, y una cantidad:

$$X' = 6 * 10^4 \left( \frac{V_{SL} \rho_L}{V_{SG} \rho_G} \right)^{0.9} \left( \frac{\mu_L^{0.19} \sigma^{0.205} \rho_G^{0.7} \mu_G^{2.75}}{G_M^{0.435} \rho_L^{0.72}} \right) \quad (1-11)$$

Donde,  $G_M = (V_{SL} \rho_L + V_{SG} \rho_G)$  la velocidad másica en  $lb_m / ft^2 \cdot s$ , la  $\mu$  y  $\sigma$  están en unidades de gr – cm – segundos, y las densidades en  $lb_m / ft^3$ .

Figura 82. Correlación de Holdup para mezclas Gas-Líquido.



Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

### 1.3 Gradientes de presión.

Debido a efectos de gravedad, fricción y aceleración, se pueden producir pérdidas de energía en el sistema, que se verían reflejadas en la disminución de la presión. El procedimiento que se sigue para calcular la caída de presión en una tubería inclinada es el siguiente: se determina el patrón de flujo y el holdup asumiendo que la tubería es horizontal. El holdup hallado se corrige por el efecto de la inclinación con el fin de calcular la caída de presión posteriormente con alguno de los métodos que se plantean a continuación.

### 1.3.1 Correlación De Lockhart & Martinelli.

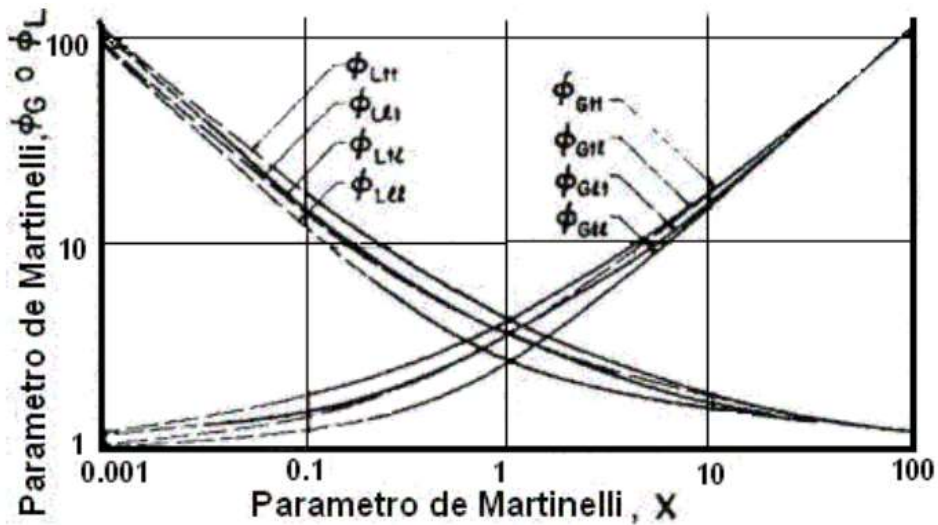
Ellos basan su correlación en la premisa de que la caída de presión debe ser igual tanto para la fase líquida como para la fase gaseosa sin importar el patrón de flujo, con la condición que haya un delta de presión radial despreciable. Por medio de su trabajo, expresan la caída de presión en la fase líquida como sigue:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{lp} = 2f_L \left(\frac{\rho_L V_L^2}{D_L g}\right) \quad (1-12)$$

Donde  $D_L$  es el diámetro hidráulico equivalente de la región del tubo por la cual la fase líquida fluye. Igual ocurre con la fase gaseosa:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{gp} = 2f_G \left(\frac{\rho_G V_G^2}{D_G g}\right) \quad (1-13)$$

Figura 83. Relaciones de Lockhart-Martinelli.



Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

Baker ha realizado unas modificaciones a la correlación de Lockhart & Martinelli para tuberías de mayor diámetro, esta nueva correlación es expresada para cada patrón de flujo.

Tabla 5. Correlaciones para cada patrón de flujo según Baker.

Patrón de Flujo	Correlación
Estratificado	$\phi_G = \frac{15400X}{G_{SL}^{0.8}}$
Burbujas Elongadas	$\phi_G = \frac{27.315X^{0.855}}{G_{SL}^{0.17}}$
Burbujas Dispersas	$\phi_G = \frac{14.2X^{0.75}}{G_{SL}^{0.1}}$
Bache	$\phi_G = \frac{1190X^{0.815}}{G_{SL}^{0.5}}$
Niebla Anular	$\phi_G = (4.8 - 0.3125D)X^{0.343-0.021D}$

Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

Donde  $G_{SL}$  es la tasa de flujo másico superficial del líquido en lbm/ft<sup>2</sup>.hr. No existe una ecuación para el flujo ondulado. Por último, hay que tener en cuenta que las relaciones se aplican cuando el número de Reynolds superficial para cada fase supera 1000.

### 1.3.2 Correlación De Dukler, Wicks & Cleveland.

En 1964 presentaron un estudio estadístico en el que analizaban varias de las correlaciones existentes en el momento, comparando su desempeño y concluyeron que aunque la de Lockhart & Martinelli tenía la mejor concordancia de todas, aún le faltaba para tener una buena consistencia. Debido a esto desarrollaron una nueva correlación para la caída de presión por fricción en el flujo

bifásico. Se parte de la premisa de que el holdup es finito y constante, se supone la mezcla homogénea de las fases, en la que no hay deslizamiento de una sobre otra, y el resultado de esta correlación fue estadísticamente superior a las anteriormente estudiadas por ellos.

El gradiente de presión debido a la fricción es expresado como:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2G_M^2 f_{ipM}}{g_c D \rho_M} \quad (1-14)$$

Dónde:

$$f_{ipM} = F \beta f \quad (1-15)$$

$$f = 0.0014 + 0.125 \text{Re}_M^{-0.32} \quad (1-16)$$

$$\text{Re}_M = \frac{DG_M}{\mu_M} \quad (1-17)$$

$$F = 1 + \frac{\gamma}{1.281 - 0.478\gamma + 0.444\gamma^2 - 0.094\gamma^3 + 0.00843\gamma^4} \quad (1-18)$$

$$\gamma = -\ln C_L \quad (1-19)$$

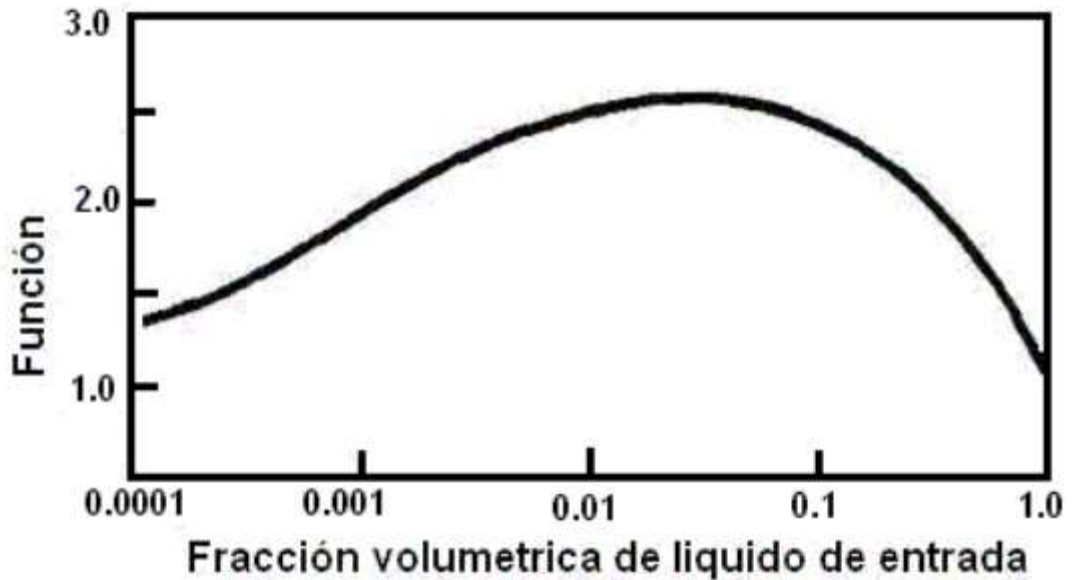
$$G_M = \rho_m * v_m \quad (1-20)$$

$$\beta = \frac{\rho_L C_L^2}{\rho_M \bar{E}_L} + \frac{\rho_G (1 - C_L)^2}{\rho_M \bar{E}_G} \quad (1-21)$$

En la ecuación de gradiente de presión, F es adimensional y está en función de  $C_L$ , la fracción volumétrica del líquido en la corriente de entrada (Figura 84). El cálculo

del factor  $\beta$  requiere conocer el valor de  $E_G$  la fracción de gas in situ. Para esto, Dukler uso la correlación de Hughmark ya ilustrada.

Figura 84. Función de Dukler, Wicks & Cleveland.



Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

### 1.3.3 Método De Beggs & Brill.

El método diseñado por Beggs y Brill es el más aplicado para el cálculo del gradiente de presión, ya sea para pozo vertical, direccional, tubería horizontal o inclinada. Para este cálculo es necesario conocer dos parámetros iniciales: el holdup y el patrón de flujo. Éste fue el primer modelo en proponer un procedimiento matemático para predecir de forma sistemática los patrones de flujo.

Para determinar el patrón de flujo se requiere de algunos cálculos con números adimensionales (como el número de Froude para dos fases) y además establecer límites entre los patrones de flujo.

Se necesitan las siguientes variables para determinar cualquier patrón de flujo:

$$N_{FR} = \frac{V_m^2}{gd} \quad (1-22)$$

$$\lambda_l = \frac{V_{sl}}{V_m} \quad (1-23)$$

$$L_1 = 316\lambda_L^{0.302} \quad (1-24)$$

$$L_2 = 0.0009252\lambda_L^{-2.4684} \quad (1-25)$$

$$L_3 = 0.10\lambda_L^{-1.4516} \quad (1-26)$$

$$L_4 = 0.5\lambda_L^{-6.738} \quad (1-27)$$

Los límites de patrones de flujo según Beggs y Brill para flujo horizontal son:

Tabla 6

. Límites para los patrones de flujo según Beggs & Brill.

Patrón de Flujo	Límites
Segregado	$\lambda_L < 0.01$ y $N_{FR} < L_1$ ó $\lambda_L > 0.02$ y $N_{FR} < L_2$
Transición	$\lambda_L > 0.01$ y $L_2 < N_{FR} < L_3$
Intermitente	$0.01 < \lambda_L < 0.4$ y $L_3 < N_{FR} < L_1$ ó $\lambda_L > 0.4$ y $L_3 < N_{FR} < L_4$
Distribuido	$\lambda_L < 0.4$ y $N_{FR} > L_1$ ó $\lambda_L > 0.4$ y $N_{FR} > L_4$

Fuente: Flórez Jorge y Porras Alberto.

Cabe aclarar que el método de Beggs y Brill permite determinar el patrón de flujo, pero no el régimen de flujo, para lo cual se debe relacionar con otros regímenes de flujo como el de Mandhane, Taitel y Dukler o el de Baker.

Habiendo calculado el patrón de flujo, se utiliza la fórmula correspondiente para el cálculo del holdup, tratada en la sección 1.2.7. Después se procede a determinar:

$$(\Delta P)_T = (\Delta P)_G + (\Delta P)_F + (\Delta P)_A$$

**Pérdidas por Fricción:**

$$(\Delta P)_F = \frac{f \rho_m v_m^2}{2D} \quad (1-28)$$

$$\frac{f}{f_N} = e^s \quad (1-29)$$

$$s = \frac{\text{Ln}(y)}{-0.0523 + 3.182 \text{Ln}(y) - 0.8725 [\text{Ln}(y)]^2 + 0.01853 [\text{Ln}(y)]^4} \quad (1-30)$$

$$y = \frac{\lambda_L}{H_L^2} \quad (1-31)$$

Si  $1 < y < 1.2$  entonces:

$$s = \ln(2.2y - 1.2) \quad (1-32)$$

**Pérdidas por Gravedad:**

$$(\Delta P)_G = \rho_s g \quad (1-33)$$

$$\rho_s = \rho_l H_l + \rho_g H_g \quad (1-34)$$

**Pérdidas por aceleración:**

$$(\Delta P)_A = \frac{\rho_s v_m v_{sg}}{P} \Delta P \quad (1-35)$$

También se puede definir la caída de presión de la siguiente manera, siendo P, la presión de entrada al tramo:

$$(\Delta P)_T = \frac{(\Delta P)_F + (\Delta P)_G}{1 - E_K} \quad (1-36)$$

$$E_K = \frac{\rho_s v_m v_{sg}}{P} \quad (1-37)$$

#### **1.4 Mapas de regímenes de flujo para tuberías horizontales.**

Mapas de regímenes de flujo o carta de flujo son instrumentos gráficos en que datos de entrada como, por ejemplo, las velocidades superficiales de los fluidos, son utilizadas para la determinación del patrón de flujo ( forma como las fases que componen el flujo están distribuidas) en un determinado medio a ser estudiado, que puede ser un tubo o ducto.

Al principio, la industria adoptó cartas de flujo experimentales. Sin embargo, diversos parámetros como el diámetro del tubo, presión, razón de masas específicas y razón de viscosidades afectaban las fronteras de transición de los patrones de flujo.

Así, se puede decir que no hay carta de flujo experimental genérica para flujos de dos fluidos inmiscibles. Fue necesario, entonces, el desarrollo de modelos que pudieran prever de forma genérica tales fronteras. Uno de los modelos utilizados es la fenomenológica,( HEWITT, 1978), basado en observaciones experimentales, donde correlaciones son propuestas y ajustadas empíricamente para representar los fenómenos observados. Tales modelos tienen previsto con buena aproximación las fronteras de transición, además de la caída de presión y fracción volumétrica.

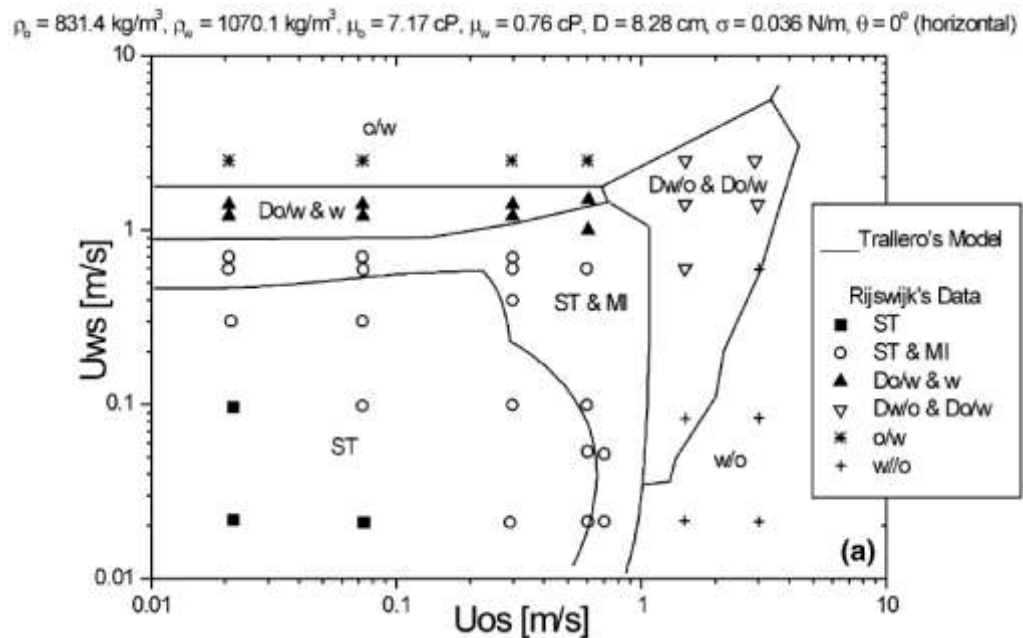
##### **1.4.1 Mapas de regímenes de flujo para líquido-líquido.**

Las cartas de flujo en flujo liquido-liquido son en general basadas en las velocidades superficiales de las fases o componentes, es decir, son cartas dimensionales; así, se tendría un mapa para cada par de fluidos utilizados.

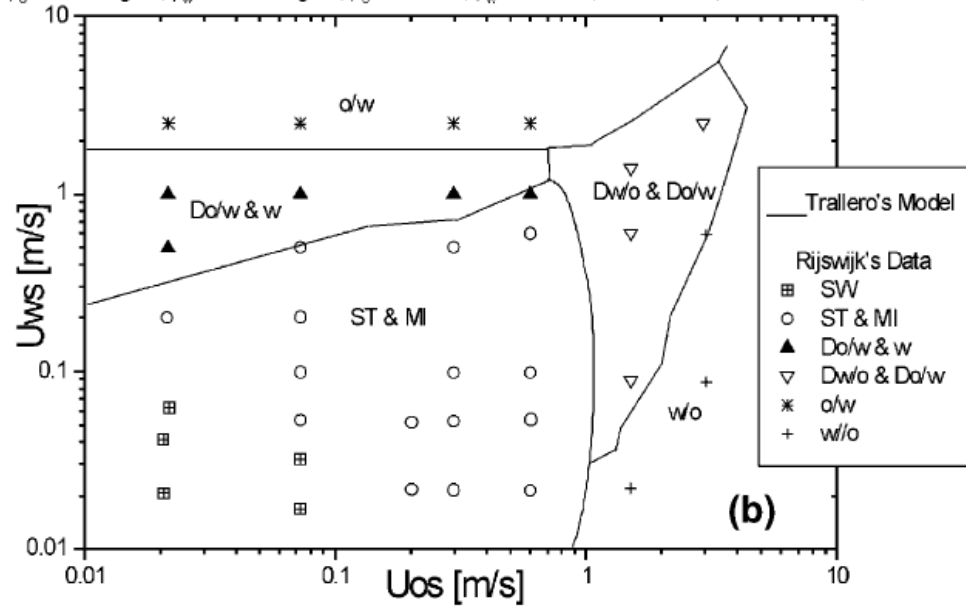
### 1.4.1.1 Mapas de regímenes de Rodriguez & Oliemans.

Rodriguez y Oliemans (2006) propusieron mapas de regímenes para flujos de aceite leve-agua, con puntos experimentales y previsiones basadas en la teoría de Trallero (1995). Los mapas fueron hechos para diversas inclinaciones con un tubo de 82,8 mm y un aceite de 7,17 mPa.s. Algunos mapas propuestos son presentados en la Figura 85.

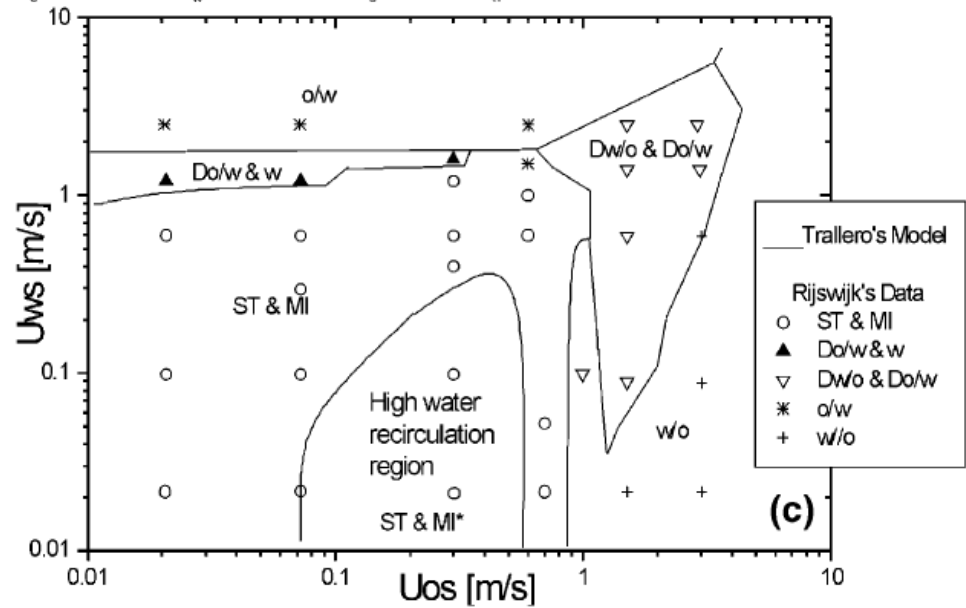
Figura 85. Mapas de Regimenes de Rodriguez y Oliemans (2006) para flujo de aceite-agua: (a) Horizontal, (b)  $-5^\circ$ , (c)  $5^\circ$ .



$\rho_o = 830.1 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_w = 1071.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_o = 6.86 \text{ cP}$ ,  $\mu_w = 0.74 \text{ cP}$ ,  $D = 8.28 \text{ cm}$ ,  $\sigma = 0.036 \text{ N/m}$ ,  $\theta = -5^\circ$



$\rho_o = 831.4 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_w = 1071.5 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_o = 7.42 \text{ cP}$ ,  $\mu_w = 0.77 \text{ cP}$ ,  $D = 8.28 \text{ cm}$ ,  $\sigma = 0.036 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 5^\circ$



Fuente: Souza de Castro.

#### 1.4.1.2 Mapas de regímenes de Banwart.

Para altas razones de viscosidad, en flujo horizontal, fue propuesta una carta experimental por Banwart (2004). Debido a la alta razón de viscosidad los patrones dispersos no ocurren.

#### 1.4.1.3 Correlación de Baker.

Los mapas de regímenes de flujo son usados para predecir los patrones de flujo en una tubería horizontal. Uno de los primeros mapas que se diseñaron fue creado por Baker en 1953, más tarde modificado por Scoot, en la cual los ejes son  $G_l / \lambda G_l$   $\lambda_p / G_g \lambda$ , donde  $G_l$  y  $G_g$  son el flujo másico del líquido y del gas respectivamente y el parámetro  $\lambda$  y  $\phi$  son:

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_g}{0.075} \right) \left( \frac{\rho_l}{62.4} \right) \right]^{1/2} \quad (3) \quad \phi = \frac{73}{\sigma_l} \left[ \mu_l \left( \frac{62.4}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (1-38)$$

En la Figura 87 se muestra el mapa de regímenes de flujo de Baker. En él se puede observar que las transiciones de un patrón de flujo a otro no son abruptas, pero la transición ocurre en todo el rango.

#### 1.4.1.4 Correlación De Govier & Omer:

En 1962 Govier & Omer propusieron un mapa de patrones de flujo, mejorándolo más tarde para ajustarla a modificaciones de diámetro y a las propiedades de los fluidos. Govier y Aziz sugieren una modificación de las coordenadas para aplicarlo a otros tipos de fluido diferentes al aire-agua. Recomiendan los siguientes parámetros de corrección:

$$X = \left( \frac{\rho_g}{0.0808} \right)^{1/3} \quad (1-39)$$

$$Y = \left[ \left( \frac{\rho_g}{62.4} \right) \left( \frac{72.4}{\sigma} \right) \right]^{1/4} \quad (1-40)$$

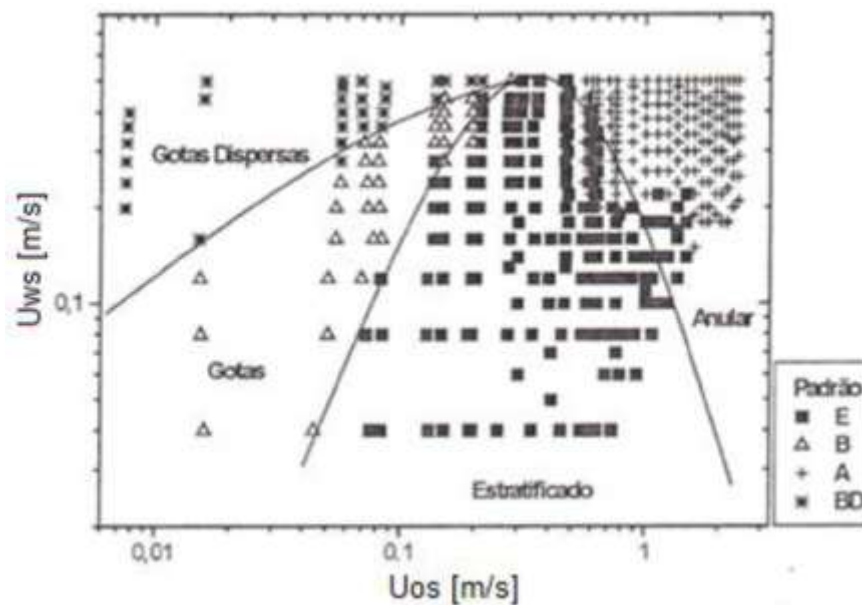
Estos parámetros son usados para multiplicar las velocidades superficiales de los fluidos de la siguiente manera:

$$\tilde{V}_{SG} = X V_{SG} \quad (1-41)$$

$$\tilde{V}_{SL} = Y V_{SL} \quad (1-42)$$

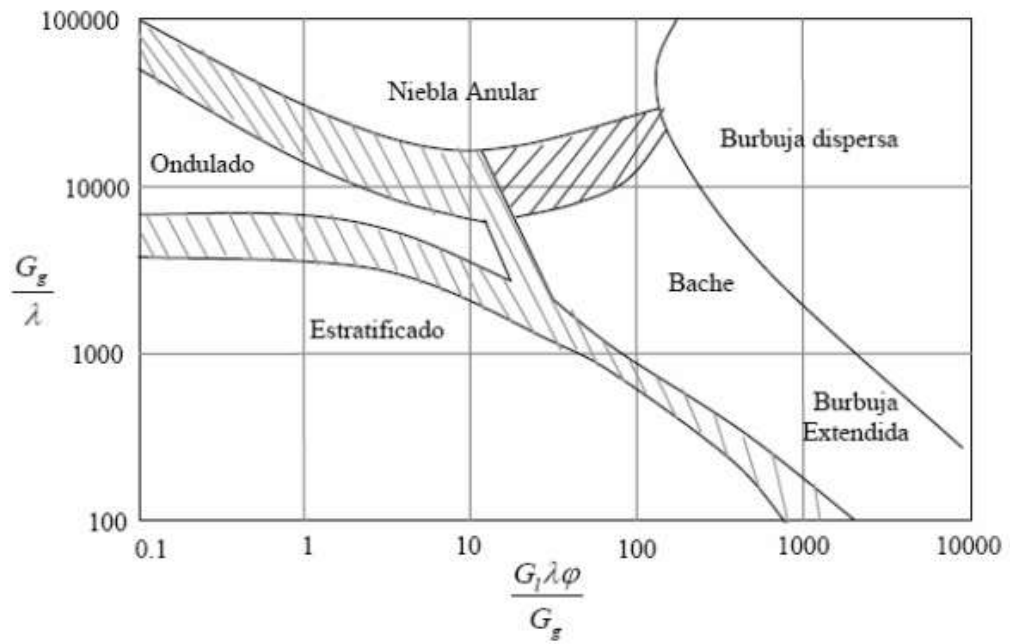
$\tilde{V}_{SG}$  y  $\tilde{V}_{SL}$  son usados en forma normal con el mapa modificado de patrones de flujo.

Figura 86. Mapa de régimen de Banwart (2004) para flujo horizontal.



Fuente: Souza de Castro.

Figura 87. Mapa de Regímenes de flujo, Baker (1953).

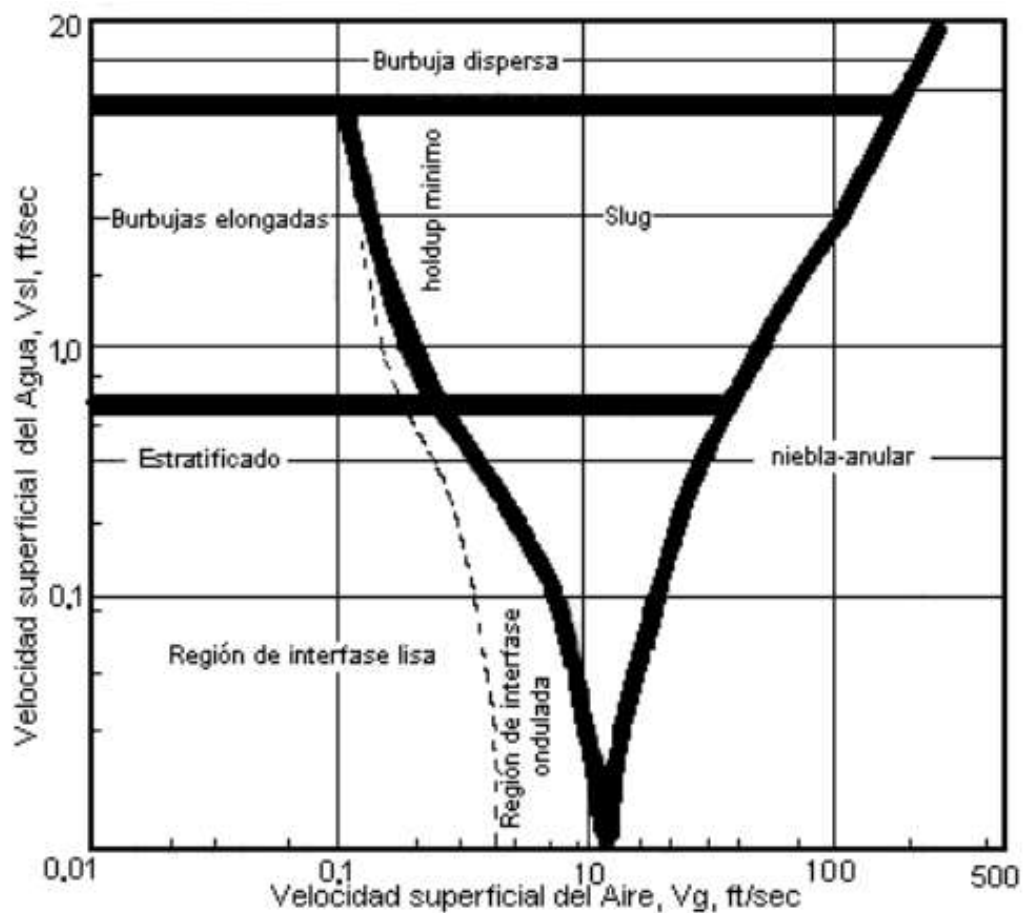


Fuente: Souza de Castro.

#### 1.4.1.5 Correlación De Mandhane.

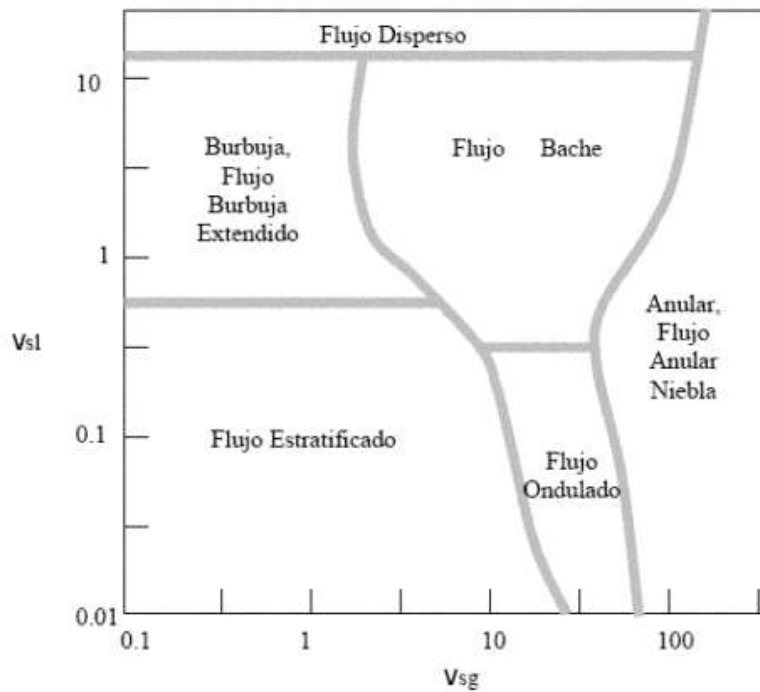
En 1964, Mandhane propone un mapa de patrones de flujo en el cual, con base en las coordenadas de  $\text{Log } V_{SL}$  vs  $\text{Log } V_{SG}$ , se localizan los límites de transición. El mapa diseñado por Mandhane usa como ejes de coordenadas las velocidades superficiales del líquido y del gas ( $V_{SL}$  Vs  $V_{SG}$ ), el cual se muestra en la Figura 89.

Figura 88. Mapa de patrones de flujo de Govier & Omer.



Fuente: Souza de Castro.

Figura 89. Mapa de regímenes de Flujo Manhane (1974).



Fuente: Souza de Castro.

Mandhane introduce los siguientes factores de corrección para las diferentes propiedades físicas de los fluidos:

$$X' = \left( \frac{\rho_G}{0.0808} \right)^{0.2} \left( \frac{\rho_L}{62.4} \frac{72.4}{\sigma} \right)^{0.25} \left( \frac{\mu_G}{0.018} \right)^{0.2} \quad (1-43)$$

$$Y' = \left( \frac{\mu_L}{1.0} \right)^{0.2} \left( \frac{\rho_L}{62.4} \frac{72.4}{\sigma} \right)^{0.25} \quad (1-44)$$

Donde  $\rho_G$  y  $\rho_L$  están expresadas en lbm/ft<sup>3</sup>,  $\mu_G$  y  $\mu_L$  están expresados en L centipoises, y  $\sigma$  en dinas/cm. Hay que tener en cuenta que estos factores se aplican a las transiciones individuales, antes que a los ejes del mapa.

#### **1.4.1.6 Correlación De Taitel & Dukler.**

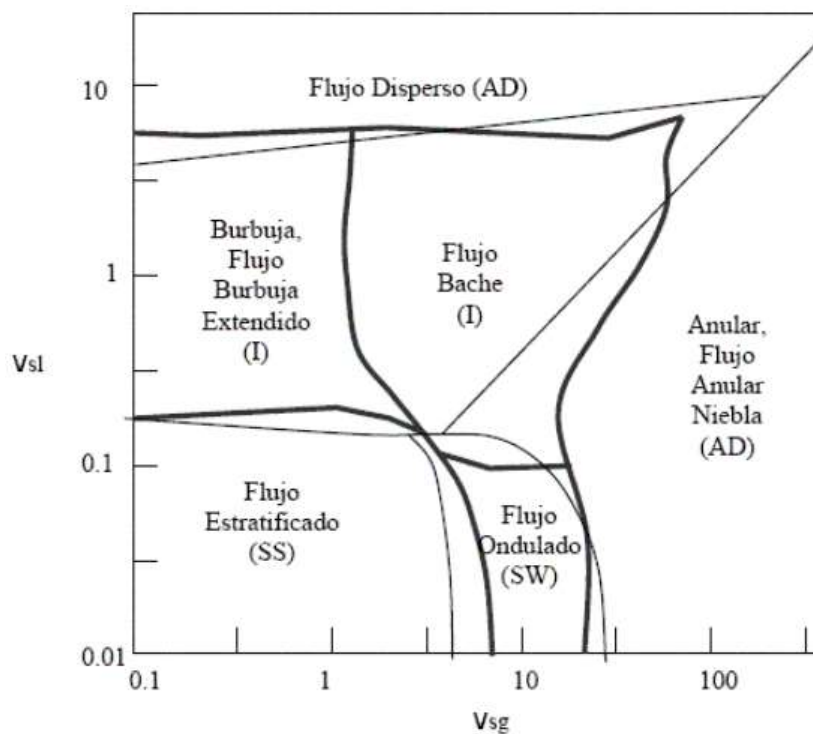
Taitel y Dukler desarrollaron un modelo en el año 1976 para las transiciones de regímenes de flujo horizontal, este modelo puede ser usado para elaborar mapas de regímenes de flujo para fluidos y diámetro de tuberías particulares, el cual se muestra en la Figura 90.

En el presenta un análisis teórico, la teoría de la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, para predecir las transiciones que ocurren entre los patrones de flujo. Para esto ellos demuestran que cada transición está controlada por un par diferente de grupos adimensionales. Con este modelo, generalizado se convirtieron en los primeros en la predicción analítica de los patrones de flujo.

#### **1.4.1.7 Correlación De Beggs & Brill**

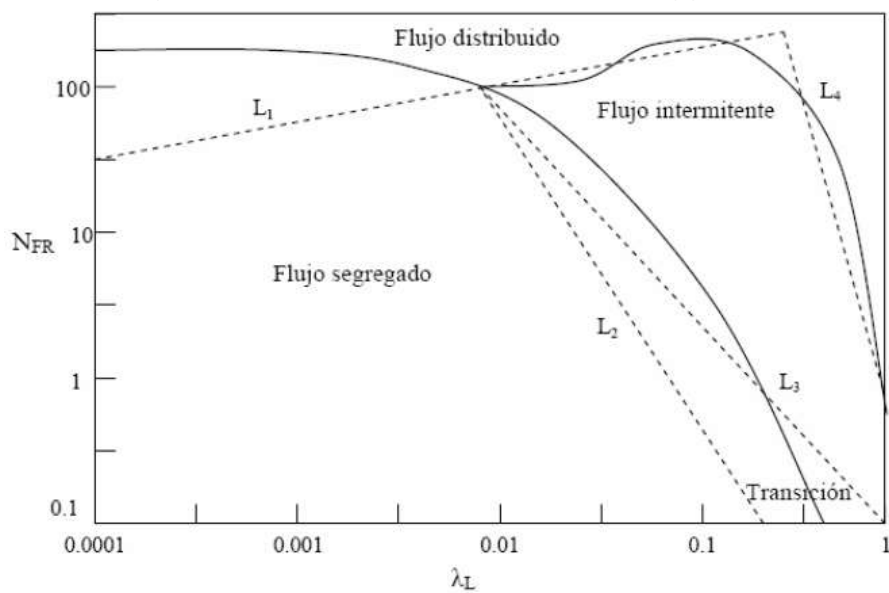
Beggs y Brill realizaron un mapa de patrones de flujo en el cual los ejes de coordenadas son el número de Froude ( $N_{FR}$ ) contra la fracción de líquido entrante  $\lambda_l$ . Este mapa se caracteriza por presentar los cuatro patrones de flujo propuestos por ellos, sin tener en cuenta los diferentes regímenes de flujo.

Figura 90. Mapa de regímenes de flujo Taitel-Dukler (1976).



Fuente: Souza de Castro.

Figura 91. Mapa del patrón de flujo Beggs & Brill.



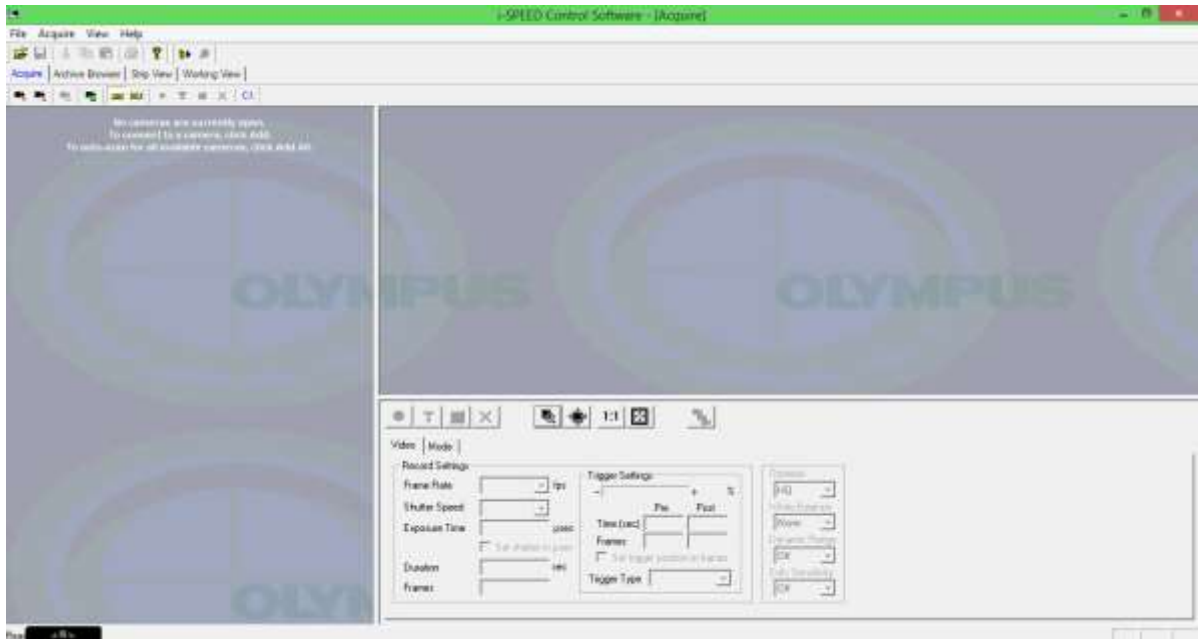
Fuente: Souza de Castro.

## Anexo H. Software i-speed Suit y Software MCSA Sequip-winORM.

### **Software i-speed suite.**

Este programa fue utilizado para medir el tamaño de las gotas de aceite y observar los videos filmados con la cámara de alta velocidad HSC. Su instalación se realizó en un computador Sony Vaio con procesador Intel core i5 y sistema operativo Windows 7, la instalación del software fue hecha con el uso de un CD que viene disponible con el equipamiento de la cámara Olympus i-speed 3. Una vez instalado el software apareció un icono en la página inicial del computador y dando doble click sobre el icono se abrió la interface del programa (Figura H1). Para observar los videos en el Software se contó con dos opciones: La primera era transmitir y grabar el video en vivo coordinando la cámara y el computador con el Software i-speed Suite con el uso de un cable USB de transmisión de datos, pero esta técnica generaba lentitud, mala calidad y errores en el video, por tal razón se llevó a cabo la segunda opción que fue coordinar la cámara de alta velocidad y la unidad de control y visualización CDU, los videos eran grabados en una memoria insertada en la CDU con rapidez y calidad, posteriormente se cargaban los videos al computador portátil y finalmente eran abiertos en el Software i-speed Suite para su análisis y visualización.

Figura 92. Interface Software Olympus i-speed Suite.



Para abrir los videos en el Software se necesitó usar la opción abrir (open en Ingles) y buscar los videos en la carpeta donde el usuario decidió guardarlos, esta opción es similar a la que usa cualquier otro Software. Una vez se da click abrir video, automáticamente el software abre la opción Strip View y muestra imágenes del video filmado (Figura 93).

Después de abrir las imágenes del video se procedió a dar doble click sobre la primera imagen, esta acción abre la opción Working View (Figura 94) donde se puede ver la reproducción del video, dar zoom, y medir el tamaño de las gotas de aceite.

Figura 93. Imágenes del video Software Olympus i-speed Suite.

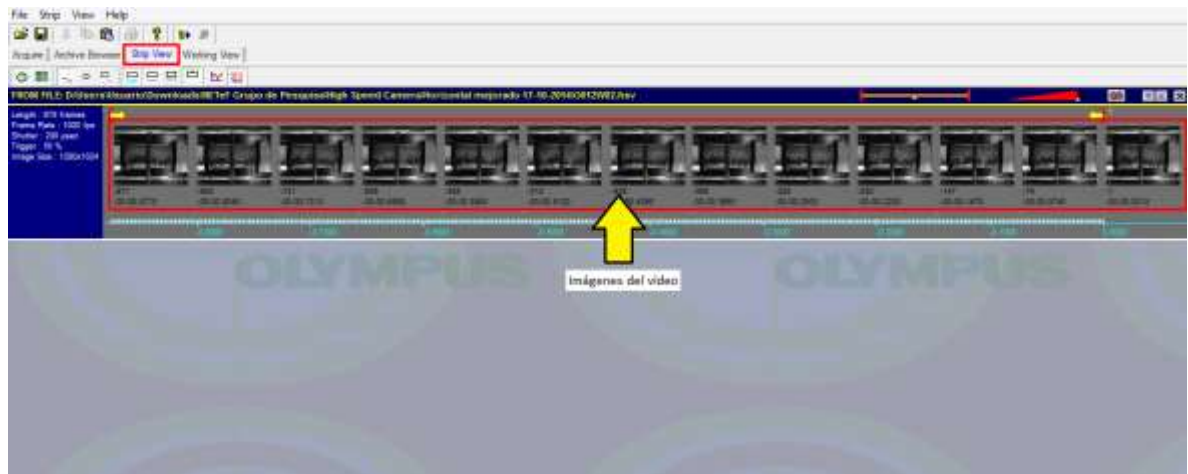


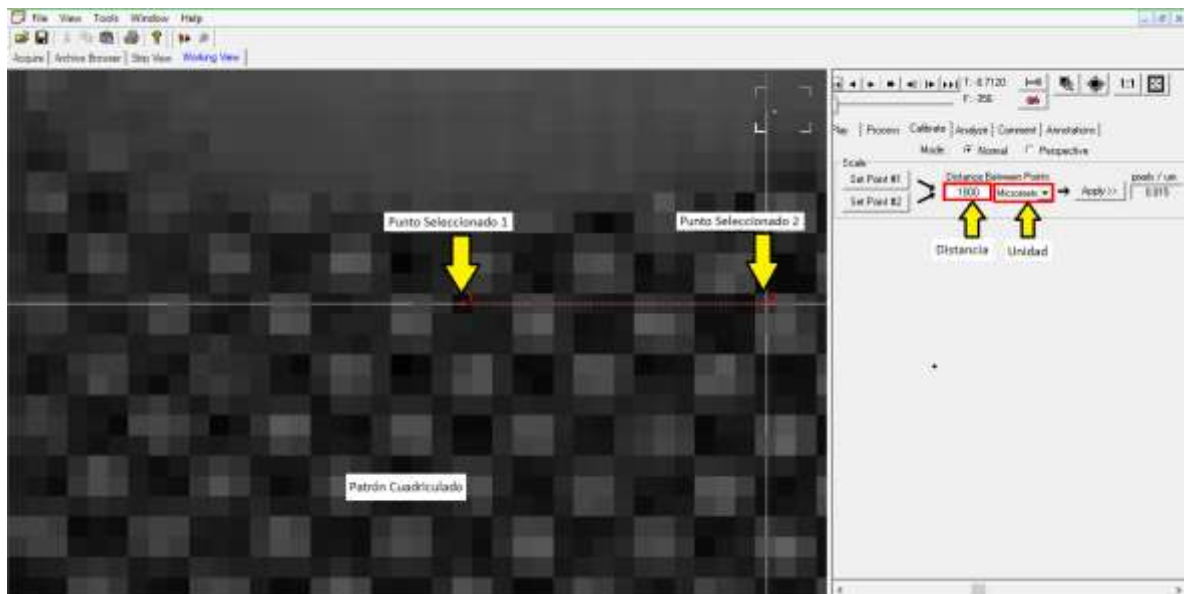
Figura 94. Working View Software Olympus i-speed Suite.



En la parte derecha de la Figura 94 se pueden ver las ventanas Play (Reproducir), Process (Proceso), Calibrate (Calibración), Analyze (Análisis), comment (comentar) y Annotations (Anotaciones) que son las herramientas que ofrece el

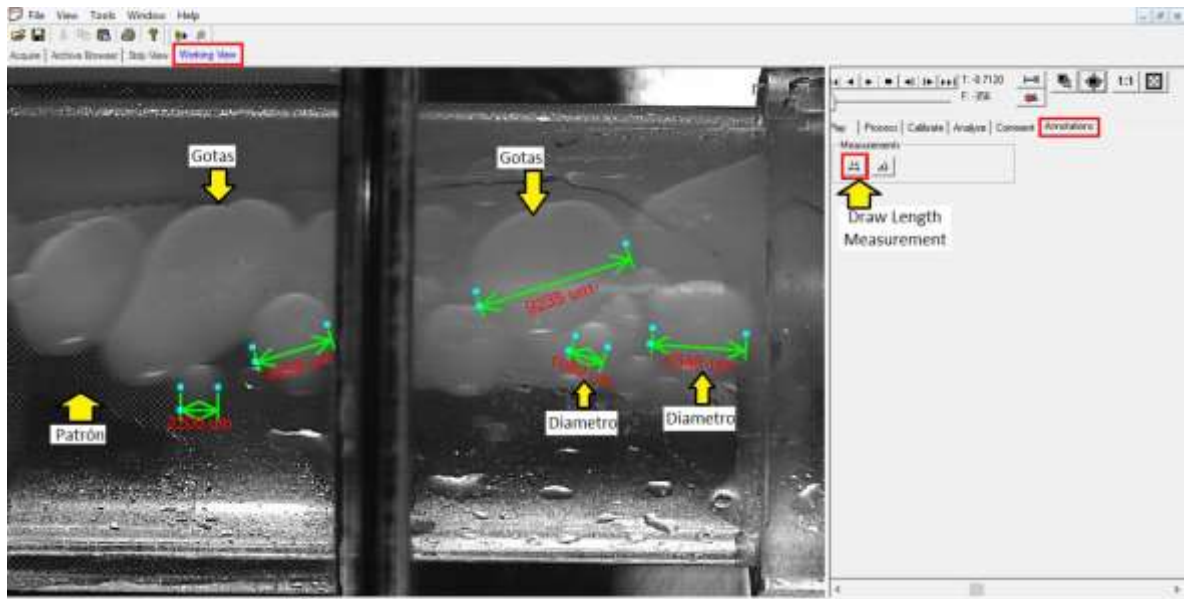
Software para analizar el video. La primera opción que se usó fue Calibrate donde se pueden colocar dos puntos de referencia sobre la imagen y dar el valor de esa distancia al software (Figura 95), esta distancia debe ser previamente conocida, en este caso se usó un patrón cuadrículado guía presentado en la sección 2.1.5, donde cada cuadro tiene un valor de 0,2mm o 200  $\mu\text{m}$  de cada lado, en el análisis del video se acercó la imagen y se usaron 5 cuadros y se ingresó un valor de 1000  $\mu\text{m}$ , el objetivo de usar la unidad de micras es porque la mayoría de las gotas son de tamaños muy variables y para medirlos se necesita la unidad de micras.

Figura 95. Calibrate Software Olympus i-speed Suite.



Cuando se ingresa en el Software la calibración se puede continuar con la opción de Annotations, donde se selecciona el cuadro Draw Length Measurement (Figura 96) y se procede a reproducir el video, detenerlo y medir el tamaño de las gotas.

Figura 96. Annotations Software Olympus i-speed Suite.



### Software MCSA Sequip-winORM.

Este software fue utilizado para almacenar y guardar los tamaños de gotas medidos por el sensor medidor de tamaño de partículas ORM. Al igual que el software i-speed Suite la instalación de este software fue hecha con la ayuda de un CD que viene disponible con el equipamiento e instrumentación del sensor ORM, y el software fue instalado en un computador portátil Sony Vaio con procesador Intel core i5 y sistema operativo Windows 7. En la Figura 97 se puede ver la interface inicial del Software MCSA Sequip-WinORM sin estar conectado al sensor ORM.

Una de las características de este Software es que se pueden ver los tamaños de las gotas medidos por el sensor ORM en tiempo real, pero para observar esto se deben conectar primero el sensor ORM y el Software WinORM a través de un cable USB de transmisión de datos (Figura 37) y escoger la opción System-Device Setup (Figura 98) en el Software.

Figura 97. Interface Software MCSA Sequip-WinORM.

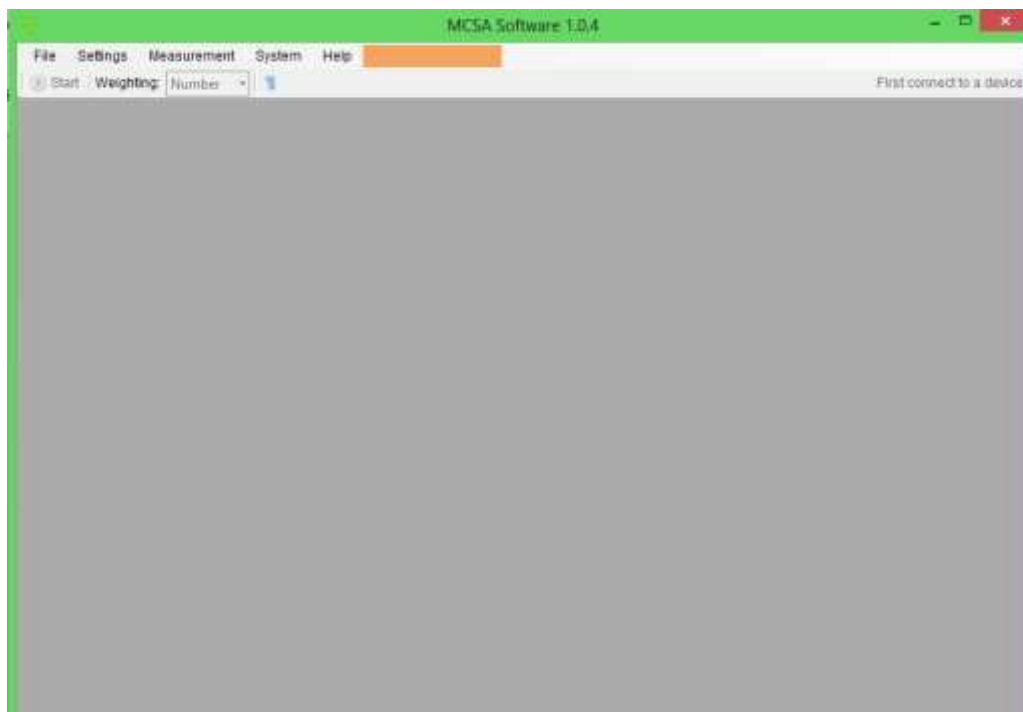
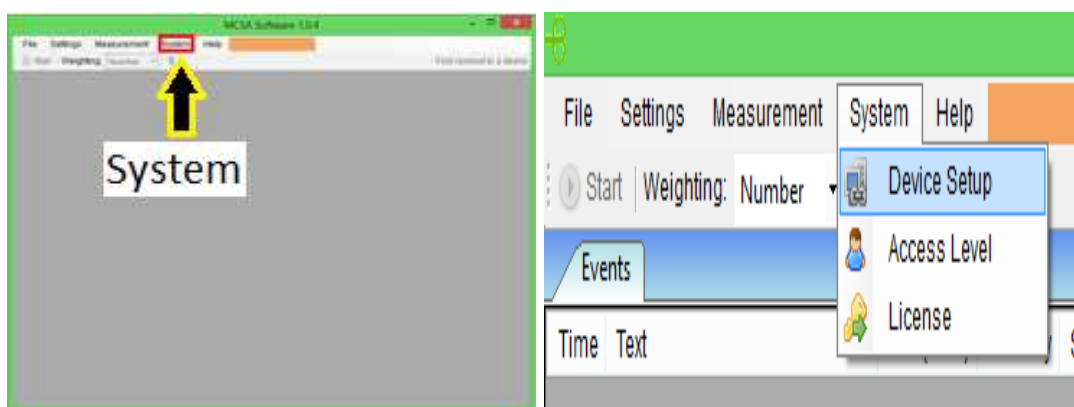


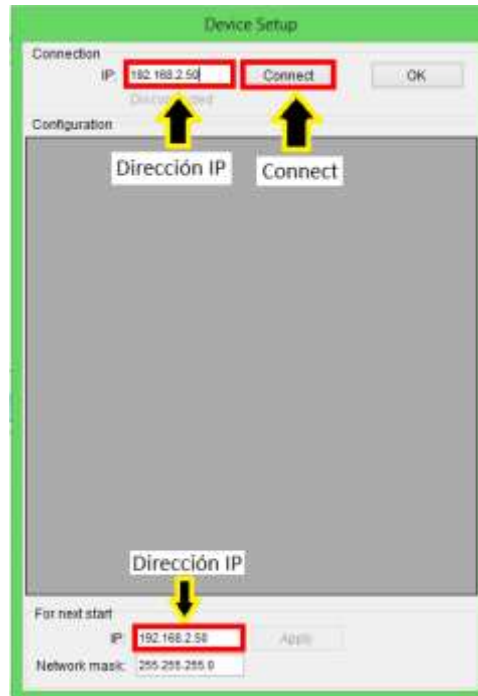
Figura 98. System-Device Setup Software MCSA Sequip-WinORM.



Al seleccionar las opciones System-Device Setup se abrirá una ventana (Figura 99) donde se debe escribir la dirección IP del sensor, en este caso la

dirección IP del sensor ORM es 192.168.2.50, por otro lado también debe ser modificar la dirección IP del computador; una vez la dirección IP del computador y del sensor ORM son compatibles se procede a dar click en connect y el sensor y el software estarán en comunicación.

Figura 99. Device Setup Software MCSA Sequip-WinORM.



Una vez se garantiza la conexión entre el sensor ORM y el Software WinORM se procede a crear un nuevo archivo o abrir un archivo ya existente; esta opción se realiza al dar click en File-New/Open (Figura 100).

Figura 100. Crear o abrir un archivo - Software WinORM.

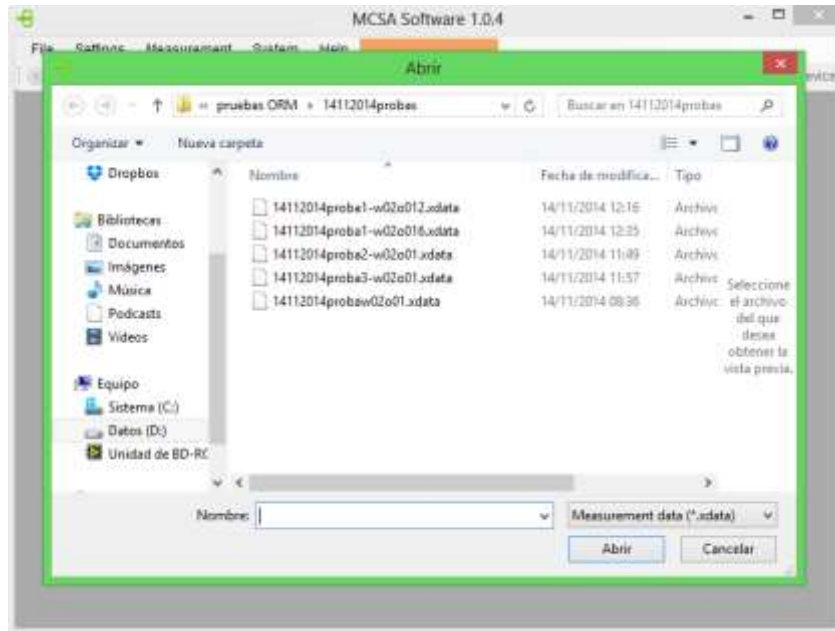
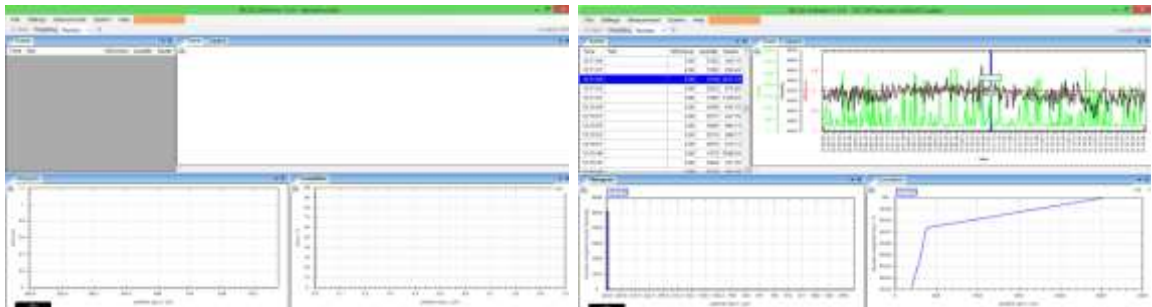


Figura 101. Software WinORM a) Archivo Nuevo, b) Archivo ya existente.



a)

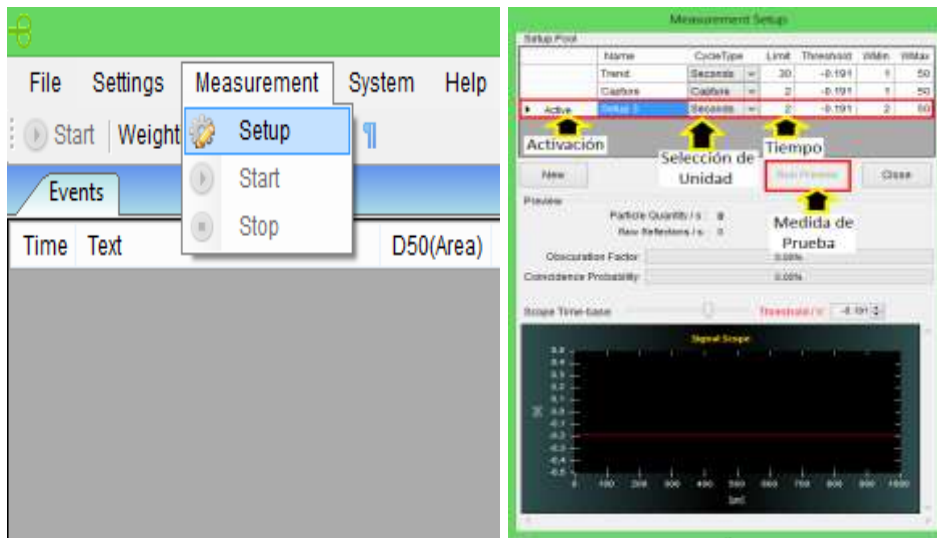
b)

En la Figura 100 se puede ver la ventana donde el usuario decide si quiere crear un nuevo archivo o abrir un archivo ya existente donde ya había guardado los datos con anterioridad; para realizar esta acción de abrir solo necesita seleccionar el archivo y dar click en abrir y se verá una imagen como la de la Figura 101. Por

otro lado si el usuario desea crear un archivo completamente nuevo debe dar click en abrir sin seleccionar nada, de esta forma se creará un archivo nuevo y se verá como en la Figura 101a.

Cuando el archivo es nuevo, se procede a seleccionar el intervalo de tiempo en el cual desea ver el número y tamaño de gotas que el sensor ha medido. Para seleccionar esta opción se debe ir a Measurement-Setup (Figura 102a) y se abrirá una ventana como en la Figura 102b, en esta ventana llamada Measurement Setup se selecciona la unidad de tiempo y escribimos la cantidad en la cual se desean ver los datos medidos. Además se puede dar una medición de prueba al dar click en Run Preview.

Figura 102. Measurement Setup a) Como abrir la Ventana b) Ventana de selección.



a)

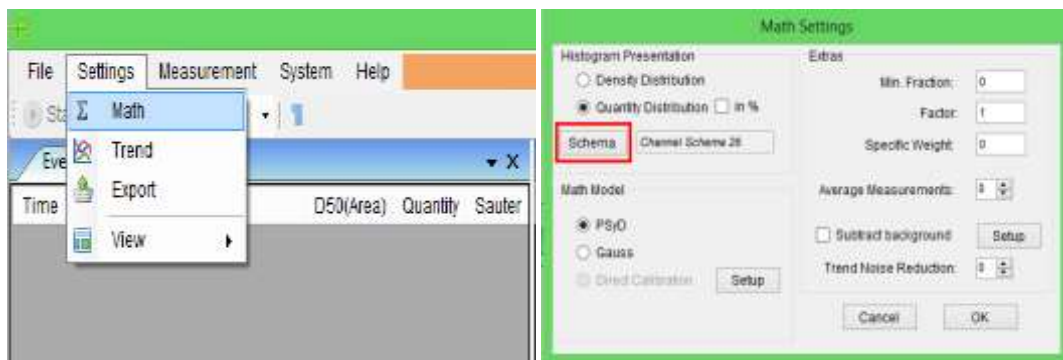
b)

En la Figura 103a se puede ver las opciones (Settings – Math) que se deben seleccionar para abrir la ventana de herramientas matemáticas, en esta última ventana (Math Settings) se debe dar click en la opción Schema y se abrirá una

nueva ventana llamada Channel Schema Manager (Figura 104) donde se puede escribir el rango hipotético de las gotas a medir. Para escribir este rango se debe escribir el diámetro mínimo de la gota y el número de canales y por defecto el sistema seleccionará el diámetro máximo, por recomendación del fabricante el máximo número de canales debe ser 125. Finalmente una vez hechas las configuraciones al sistema y verificadas las conexiones sólo se debe dar click a la opción Start y el Software comenzará a mostrar en pantalla los datos medidos por el sensor ORM como en la Figura 101b.

Finalmente el Software WinORM también ofrece la opción de elegir el rango de medición que el usuario desea analizar (Figura 104), es decir, el diámetro mínimo y máximo que hipotéticamente tienen las gotas a medir; al seleccionar este rango de medición se puede ver en la interface del Software si las gotas medidas están entre los diámetros seleccionados. El rango de medición esta entre  $0,1\mu\text{m}$  y  $3000\mu\text{m}$  y también puede cambiarse después de realizada la medición.

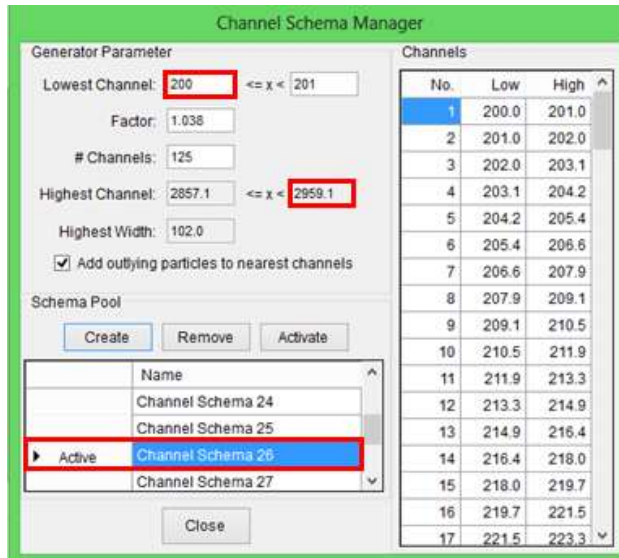
Figura 103. Configuraciones matemáticas a) Como abrir la ventana, b) Ventana de selección.



a)

b)

Figura 104. Selección de diámetro mínimo y máximo hipotético de las gotas.



## Anexo I. Datos del sensor ORM experimento básico 1.

Para una fracción de agua 0,5 y aceite 0,5 los valores medidos por el sensor ORM fueron:

- El total de las gotas medidas con un diámetro mayor a  $201\mu\text{m}$  fue de 544.
- El máximo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 96.
- El mínimo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 0.
- El promedio de gotas medidas cada 2 segundos fue de 18.
- La gota de mayor diámetro fue aproximadamente de  $834\mu\text{m}$ , con un total de 8 gotas.
- La gota de menor diámetro fue aproximadamente de  $202.5\mu\text{m}$ , con un total de 8 gotas.
- Las gotas que más se repitieron (moda) fueron las de un diámetro  $550\mu\text{m}$  y  $595\mu\text{m}$  con un total de 32 gotas para cada diámetro.
- El diámetro de gota que el sensor no pudo medir fue: 201.5, 203.5, 205.5-210, 213, 214, 217-224, 228-230, 237, 247-272, 280-284, 293, 302, 312, 340, 359, 373-390, 406, 425, 445, 500-512, 538, 645, 682, 745, 790, 860-3000  $\mu\text{m}$ .
- El diámetro promedio de gota fue de  $451\mu\text{m}$ .

## Anexo J. Datos del sensor ORM experimento básico 2.

Para una fracción de agua 0,3 y aceite 0,7 los valores medidos por el sensor ORM fueron:

- El total de las gotas medidas con un diámetro mayor a  $201\mu\text{m}$  fue de 3000.
- El máximo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 552.
- El mínimo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 0.
- El promedio de gotas medidas cada 2 segundos fue de 97.
- La gota de mayor diámetro fue aproximadamente de  $1790\mu\text{m}$ , con un total de 16 gotas.
- La gota de menor diámetro fue aproximadamente de  $201.5\mu\text{m}$ , con un total de 32 gotas.
- La gota que más se repitió (moda) fue la de un diámetro de  $615\mu\text{m}$  con un total de 88 gotas.
- El diámetro de gota que el sensor no pudo medir fue: 213, 1000, 1065, 1140-1170, 1430, 1520, 1850-3000 $\mu\text{m}$ .
- El diámetro promedio de gota fue de  $471\mu\text{m}$ .

### Anexo K. Datos del sensor ORM experimento básico 3.

Para una fracción de agua 0,15 y aceite 0,85 los valores medidos por el sensor ORM fueron:

- El total de las gotas medidas con un diámetro mayor a  $201\mu\text{m}$  fue de 3264.
- El máximo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 296.
- El mínimo número de gotas medidas en 2 segundos fue de 8.
- El promedio de gotas medidas cada 2 segundos fue de 109.
- La gota de mayor diámetro fue aproximadamente de  $1065\mu\text{m}$ , con un total de 8 gotas.
- La gota de menor diámetro fue aproximadamente de  $201.5\mu\text{m}$ , con un total de 56 gotas.
- Las gotas que más se repitieron (moda) fueron las de un diámetro de 280 y  $353\mu\text{m}$  con un total de 88 gotas para cada diámetro.
- El diámetro de gota que el sensor no pudo medir fue: 580, 615, 667, 725, 940, 1035, 1098-3000 $\mu\text{m}$ .
- El diámetro promedio de gota fue de  $345\mu\text{m}$ .